

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

**Rozbor ztrát při výrobě, přenosu a rozvodu
elektrické energie**

**Analysis of Losses at Production, Transmission and
Distribution of Electrical Power**

2012

Miroslav Dostál

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání bakalářské práce

Student:

Miroslav Dostál

Studijní program:

B2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

3907R001 Elektroenergetika

Téma:

Rozbor ztrát při výrobě, přenosu a rozvodu elektrické energie
Analysis of Losses at Production, Transmission and Distribution of
Electrical Power

Zásady pro vypracování:

1. Rozdělení elektrických ztrát
2. Rozbor jednotlivých druhů ztrát
3. Možnosti snižování ztrát

Seznam doporučené odborné literatury:

1. Heřman, J.: Příručka silnoproudé elektrotechniky, SNTL, Praha, 1984
2. Hradílek, Z.: Elektroenergetika, skriptum VŠB-TUO, Ostrava, 1992
3. Další literatura podle pokynu vedoucího bakalářské práce

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Petr Krejčí, Ph.D.**

Datum zadání: 30.11.2011

Datum odevzdání: 04.05.2012

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

„Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V Ostravě dne: 4.5. 2012

podpis: 

Poděkování:

Chtěl bych poděkovat své rodině za podporu při studiu a při tvorbě této práce. Rovněž bych chtěl poděkovat vedoucímu své bakalářské práce doc. Ing. Petrovi Krejčímu, Ph.D. za poskytnutí cenných rad při řešení daného problému.

Abstrakt

Ve své bakalářské práci se zabývám rozbořem ztrát při výrobě, přenosu a rozvodu elektrické energie. Danou problematiku jsem rozčlenil do základních skupin, a to jako technické ztráty stálé, proměnné a netechnické, dále zkoumám, jaký mají tyto ztráty vliv na výrobu, přenos a rozvod elektrické energie. Pro následný rozbor jsem využil hlubší práce s materií technických ztrát stálých k diferenciaci na podskupiny výrobní, korunou, svodem, ztráty v dielektriku, ztráty na transformátorech na prázdno a ztráty trvalé spotřeby měřících a řídících prvků. Technické ztráty proměnné jsem pak rozdělil na Jouleovy ztráty na vedení, ztráty na transformátorech nakrátko, Jouleovy ztráty přechodových odporů a Jouleovy ztráty jistících prvků. V dalších částech práce popisuji blíže ztráty netechnické související s výkonem řídící, kontrolní a obchodní činnosti či ztráty způsobené neoprávněným odběrem elektrické energie z elektrizační soustavy. V poslední části této práce se zabývám možnostmi snižování ztrát.

Abstract

In his thesis deals with the analysis of losses in the production, transmission and distribution of electricity. I divided the given problem into basic groups, such as technical losses permanent, variable and non-technical, and I investigate how these losses have an impact on production, transmission and distribution of electric energy. For subsequent analysis, I used to work with a deeper technical substance of permanent loss of differentiation into subgroups production, corona, deception, dielectric losses, transformer losses at idle and permanent loss of power measurement and control elements. Technical loss variable, I then divided the Joule losses on transmission lines, transformer losses short, Joule loss of contact resistance and Joule losses of protective elements. The next section describes the non-technical losses closely related to performance management, and control of business or loss caused by unauthorized collection of energie electric power system. In the last part of this work deals with the possibilities of reducing losses.

Klíčová slova

Výrobní ztráty, přenosové ztráty, rozvodové ztráty elektrické energie, rozdělení elektrických ztrát, druhy elektrických ztrát, snižování elektrických ztrát, ztráty

Key Words

Production losses, transmission losses, distribution losses of electricity, electrical distribution losses, types of power losses, reducing power losses, losings

Seznam použitých symbolů a zkratk:

3.f	třífázové
CO	kysličník uhelnatý
CO ₂	oxid uhličitý
č.	číslo
ČEPS	Česká přenosová soustava
ČR	Česká republika
ČSN	Česká státní norma
el.	elektrický
EZ	energetický zákon
H ₂	vodík
HDO	hromadné dálkové ovládání
i-s	diagram vodní páry
nn	nízké napětí
NO _x	oxid dusnatý
NO	neoprávněné odběry
obr.	obrázek
pozn.	poznámka
PČR	Policie České republiky
PPNM	prostředky proti neoprávněné manipulaci
resp.	respektive
Sb.	sbírky
SO ₂	oxid siřičitý
tab.	tabulka
transf.	transformátor
tzv.	takzvané
UCPTE	Union for the Coordination of Production and Transmission of Electricity - Sdružení pro koordinaci výroby a přenosu elektrické energie
UCTE	Union for the Coordination of Transmission of Electricity - Sdružení pro koordinaci přenosu elektrické energie
viz	možno vidět
vn	vysoké napětí
vvn	velmi vysoké napětí
zvn	zvlášť vysoké napětí

Poznámka: Význam dalších symbolů a zkratk je kvůli přehlednosti popsán přímo v textu této práce.

Obsah:

Úvod.....	11
1. Rozdělení elektrických ztrát.....	12
1.1 Takto vzniklé ztráty lze dělit na	12
1.1.1 Ztráty technické	12
1.1.1.1 Ztráty technické stálé zahrnují.....	12
1.1.1.2 Ztráty technické proměnné zahrnují.....	12
1.1.2 Ztráty netechnické	13
2. Rozbor jednotlivých druhů ztrát	14
2.1 Ztráty technické stálé.....	14
2.1.1 Ztráty výrobní: vznikající na generátorech, spojce, potrubí či kotli.....	14
2.1.1.1 Vstupní hodnoty potřebné pro výpočet	14
2.1.1.2 Výpočet jednotlivých účinností.....	16
2.1.1.3 Výpočet ztrát pro vykreslení Sankeyova diagramu	18
2.1.2 Ztráty korónou: venkovní vedení vvn, zvn.....	19
2.1.2.1 Definice koróny	19
2.1.2.2 Využití koróny.....	19
2.1.2.3 Údaje potřebné pro výpočet ztrát korónou	20
2.1.3 Ztráty svodem a dielektrické ztráty: na všech napěťových úrovních podle druhu vedení ...	22
2.1.3.1 Ztráty svodem.....	22
2.1.3.2 Ztráty v dielektriku.....	24
2.1.4 Ztráty transformátorů naprázdno: vznikající na všech transformačních úrovních	25
2.1.4.1 Činné ztráty transformátorů naprázdno	25
2.1.4.2 Jalové ztráty transformátoru naprázdno	26
2.1.4.3 Tabulky orientačních hodnot jmenovitých ztrát naprázdno různých transformátorů....	27
2.1.5 Trvalá spotřeba měřicích a řídících prvků na všech úrovních soustav.....	28
2.1.5.1 Trvalá spotřeba měřicích prvků.....	28
2.1.5.2 Trvalá spotřeba řídících prvků.....	29

2.2 Ztráty technické proměnné.....	30
2.2.1 Jouleovy ztráty vedení.....	30
2.2.2 Ztráty transformátorů nakrátko.....	35
2.2.2.1 Činné ztráty transformátorů nakrátko.....	35
2.2.2.2 Jalové ztráty transformátorů nakrátko	36
2.2.2.3 Tabulky orientačních hodnot jmenovitých ztrát nakrátko různých transformátorů	37
2.2.3 Jouleovy ztráty přechodových odporů.....	38
2.2.4 Jouleovy ztráty jisticích prvků.....	38
2.2.4.1 Ztráty pojistek a jističů instalovaných v síti	38
2.2.4.2 Ztráty jističů instalovaných před elektroměrem	39
2.3 Ztráty netechnické	40
2.3.1 Ztráty souvisej s výkonem řídicí, kontrolní a obchodní činnosti	40
2.3.1.1 Paušální odběry	40
2.3.1.1.1 Paušální odběry lze dělit na	40
2.3.1.2 Nepřesnost měření	40
2.3.1.3 Vadná měření	40
2.3.1.4 Nesoudobost odečtu měřidel	41
2.3.1.5 Změna nevyfakturované energie	41
2.3.1.6 Chybné odečty z měřidel	41
2.3.1.8 Nesprávné konstanty měření	42
2.3.1.9 Vadná zapojení měření	42
2.3.1.9.1 Případy vadných zapojení měření.....	42
2.3.1.10 Odběry pod hranicí citlivosti měření	42
2.3.2. Ztráty způsobené neoprávněným odběrem elektrické energie z elektrizační soustavy	42
2.3.2.1 Neoprávněným odběrem z elektrizační soustavy je	43
2.3.2.2 Zákaz neoprávněných odběrů elektriny z elektrizační soustavy	43
2.3.2.3 Dělení neoprávněných odběrů	44
3. Možnosti snižování ztrát	46
3.1 Možnosti snižování ztrát s investičními nároky	46

3.1.1	Integrace tlakového zplyňování uhlí a paroplynového cyklu	46
3.1.2	Zplyňování uhlí	47
3.1.2.1	Nejvíce propagované technologie zplyňování.....	47
3.1.3	Trendy vývoje vedoucí ke snižování ztrát.....	47
3.1.3.1	Parní turbíny	47
3.1.3.2	Fluidní spalování	47
3.1.3.3	Plynové turbíny	47
3.1.3.4	Přímá přeměna chemické energie paliva v elektřinu.....	47
3.1.3.5	Magnetohydrodynamické generátory	48
3.1.4	Kogenerační jednotky.....	48
3.1.4.1	Perspektivy kogenerace	48
3.1.4.2	Základní vzorce pro výpočet účinností kogeneračních jednotek.....	49
3.1.5	Trigenerace.....	49
3.1.6	Kompensace účinníku	50
3.1.6.1	Pojmy související s paralelní kompenzací.....	52
3.1.6.2.1	Statické kondenzátory	52
3.1.6.2.2	Rotační kompenzátory	53
3.1.6.2.3	Synchronní motory	53
3.1.6.3	Způsoby kompenzace účinníku v elektrických sítích.....	53
3.1.7	Vhodným propojením sítě	53
3.1.7.1	Typy sítí.....	53
3.1.8	Zvyšování přenosových schopností pomocí posilovacích vývodů v distribučních sítích nn	54
3.1.8.1	Postup vhodný pro stanovení parametru posilovacího vývodu	56
3.2	Možnosti snižování ztrát bez finančních nároků	56
3.2.1	Hospodárný skupinový chod a zatěžování transformátorů.....	56
3.2.1.1	Skupinový chod transformátorů	57
3.2.1.2	Hospodárné zatížení transformátoru.....	58
3.2.2	Regulace napětí	59
3.2.3	Vhodné propojení sítě.....	60

3.2.4 Rozdělení zatížení mezi elektrárnami.....	60
3.2.5 Zmenšení nesouměrnosti zatížení.....	60
3.2.6 Hospodárné zatěžování vodičů.....	60
3.2.7 Zajištění rovnováhy mezi výrobou a spotřebou elektrické energie	63
3.2.8 Pravidelná údržba zařízení	63
3.2.9 Řízení energetické soustavy	63
Závěr.....	65
Použitá literatura.....	66

Úvod

Mezi ostatními formami energie má elektřina velmi významné postavení. To je dáno jejími fyzikálními vlastnostmi - všestranné využití, nemožnost skladování, která vyžaduje řízení systému v reálném čase, vysoká účinnost, při její přímé přeměně na jinou formu energie, vysokou přesnost měření jejich jednotlivých parametrů atd. I přes to všechno byla ještě nedávno problematika ztrát vznikajících při provozu energetických zařízení na okraji zájmu. Také na řetězec činností spojený s nákupem, měřením, vyhodnocováním a prodejem elektrické energie se dříve nebral příliš velký ohled. V dnešní době je řešení ztrát elektrické energie na prvním místě a představuje v distribučních společnostech velmi významnou položku, se kterou je třeba počítat. Z obchodního hlediska se jedná o rozdíl mezi pořízenou energií a energií skutečně dodanou zákazníkovi.

Ztráty za celou distribuční společnost musí být určovány dopočtem, protože je jejich výše prakticky neměřitelná. Měřicí zařízení jsou instalována v jednotlivých částech soustav vvn a ve většině soustav vn. Tato zařízení získávají údaje o množství elektrické energie, která do soustavy vstupuje, a zároveň je porovnávají s hodnotami energie ze soustavy vystupující. Na nižších napěťových hladinách vedení vn a v distribučních soustavách nn nejsou údaje o přenášené energii k dispozici. Poslední údaj je tedy množství spotřebované elektrické energie u zákazníka. Ztráty v distribučních zařízeních vykazují provozovatelé regionálních distribučních soustav, přičemž vykázaná hodnota představuje už výše zmíněnou hodnotu rozdílu mezi nakoupenou a obchodně realizovanou energií. Hodnoty těchto ztrát jsou uváděny ve výkazu Energetického regulačního úřadu. Jedinými, kteří nemají tuto vykazovací povinnost, jsou provozovatelé lokálních distribučních soustav.

[1]

1. Rozdělení elektrických ztrát

Z technicky-obchodního hlediska vznikají ztráty na všech profilech výrobního a distribučního zařízení:

- při výrobě,
- v přenosových soustavách - 110 kV a výše mezi fázemi,
- v distribučních soustavách - 110 kV a níže mezi fázemi,
- při transformaci z jedné napěťové hladiny na jinou napěťovou hladinu - zvn/vvn/vn/nn,
- při transformaci stejných napěťových hladin (tzv. galvanické oddělení) - vn/vn,
- v sítích vn a nn.

1.1 Takto vzniklé ztráty lze dělit na:

1.1.1 Ztráty technické

Vznikají provozem distribučního zařízení dle platnosti fyzikálních zákonů. Elektrická energie se přemění v teplo (energie není užitečně využita).

- **ztráty technické stálé:** nezávislé na množství přenesené elektrické energie, ale na technických parametrech distribučního zařízení
- **ztráty technické proměnné:** mající přímou souvislost s velikostí přenášeného výkonu

1.1.1.1 Ztráty technické stálé zahrnují

- a) ztráty výrobní: vznikající na generátorech, spojce, potrubí a kotli,
- b) ztráty korónou: venkovní vedení vvn a zvn
- c) ztráty svodem a dielektrické ztráty: na všech napěťových úrovních podle druhu vedení,
- d) ztráty transformátorů naprázdno: vznikající na všech transformačních úrovních,
- e) trvalá spotřeba měřicích a řídicích prvků na všech úrovních soustav.

1.1.1.2 Ztráty technické proměnné zahrnují

- a) Jouleovy ztráty vedení: na všech napěťových úrovních sítí,
- b) ztráty transformátorů nakrátko: vznikající ve vinutí strojů, které jsou závislé na technické konstrukci vlastního stroje,
- c) Jouleovy ztráty přechodových odporů: závislé na stáří a údržbě zařízení,
- d) Jouleovy ztráty jisticích prvků.

1.1.2 Ztráty netechnické

- a) souvisejí s výkonem řídicí, kontrolní a obchodní činnosti - způsobeny chybami v měření (energie se využije)
- b) ztráty způsobené neoprávněným odběrem elektrické energie z elektrizační soustavy.

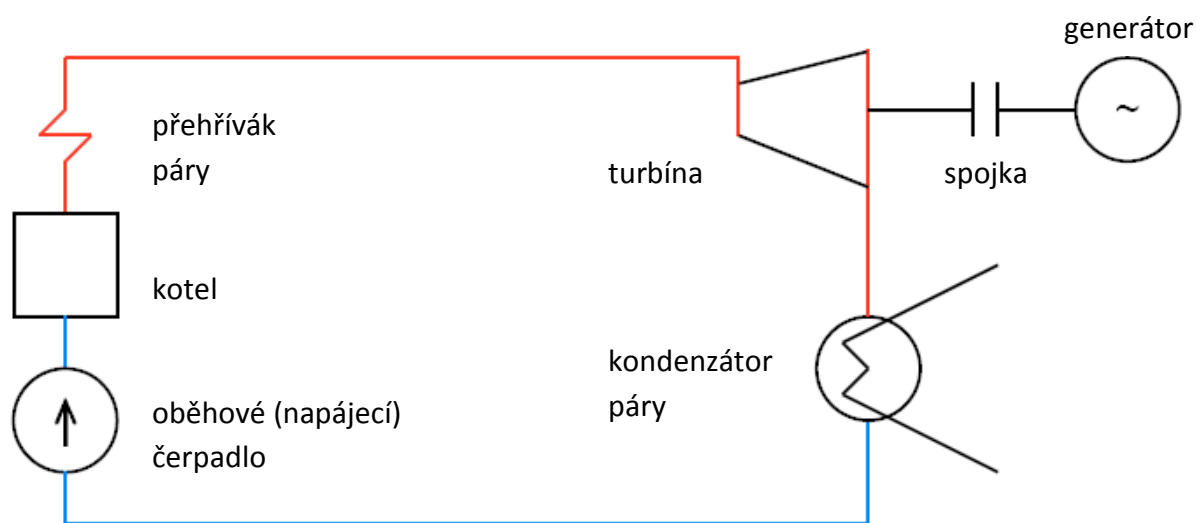
[1] [2] [11]

2. Rozbor jednotlivých druhů ztrát

2.1 Ztráty technické stálé

2.1.1 Ztráty výrobní: vznikající na generátorech, spojce, potrubí či kotli

V České Republice jsou 2/3 elektrické energie vyrobeny pomocí tepelných elektráren. Proto jsem si vybral pro demonstraci výrobních ztrát výpočet tepelné bilance a dílčí účinnosti tepelné elektrárny, jejíž zjednodušené blokové schéma je vidět na obr. 2.1.



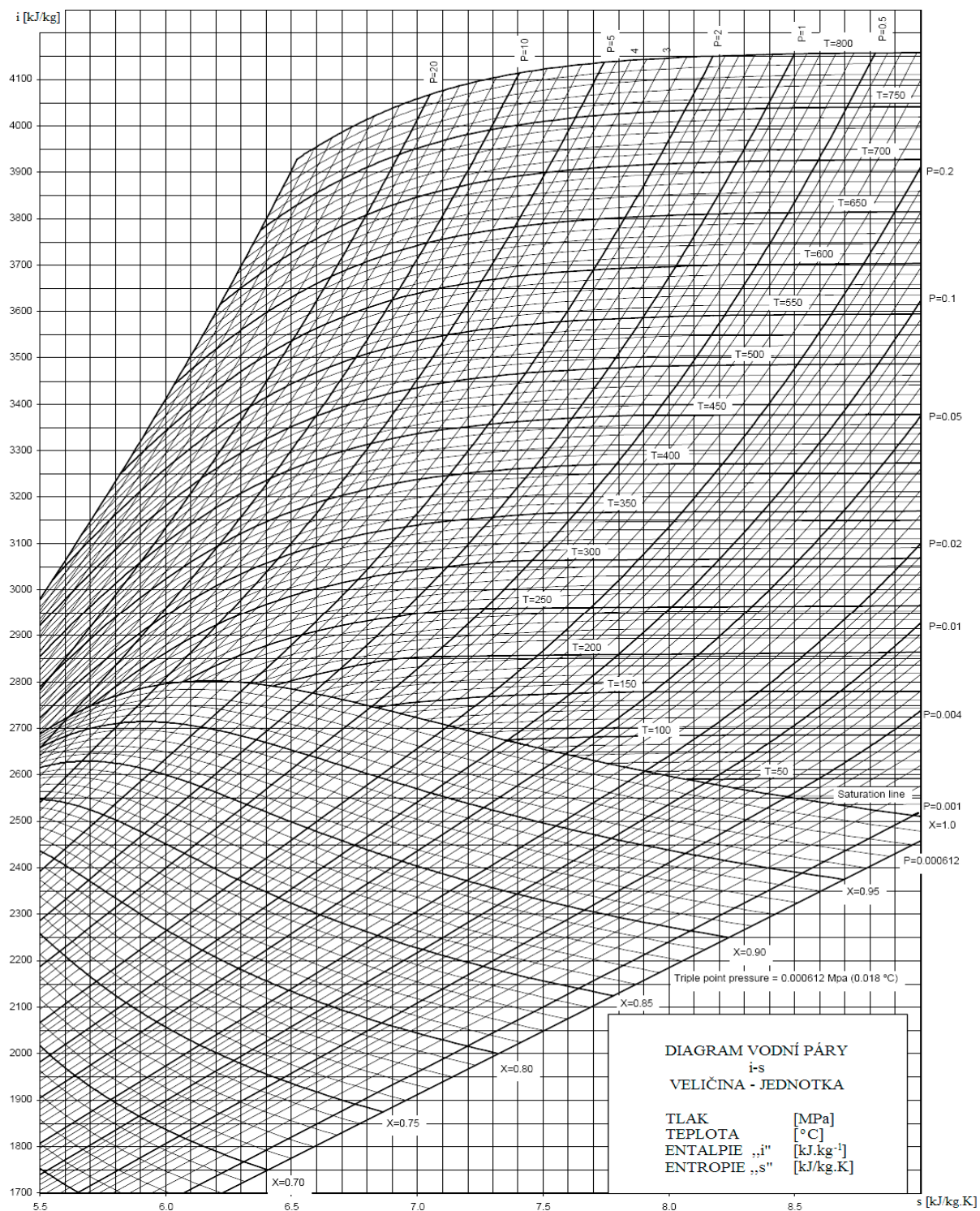
Obr. 2.1 Zjednodušené blokové schéma tepelné elektrárny s kondenzační turbínou

2.1.1.1 Vstupní hodnoty potřebné pro výpočet:

Teplota přehřáté páry na vstupu do turbíny	$t_p = 510 - 560^\circ\text{C}$
Tlak přehřáté páry	$p_p = 10 - 20 \text{ MPa}$
Suchost páry na výstupu z turbíny	$x = 0,94$
Tlak páry v kondenzátoru	$p_k = 0,004$
Účinnost kotle	$\eta_{\text{kot}} = 0,85$
Účinnost potrubí	$\eta_{\text{pot}} = 0,98$
Účinnost na spojce (mechanická)	$\eta_m = 0,97$
Účinnost generátoru	$\eta_g = 0,96$
El. výkon (brutto) na svorkách generátoru	$p_{\text{el}} = 25 \text{ MW}$
Výhřevnost paliva	$k_v = 19 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

pozn.: V České Republice jsou dosud všechny tepelné elektrárny podkritické – odpovídající teplotě a tlaku přehřáté páry viz výše, ale uvažuje se i o stavbě nadkritického bloku.

K výpočtu je potřeba si odečíst z i-s diagramu obr. 2.2 velikost entalpie i_p . Tu určíme z průsečíku hodnot p_p a t_p . Poté spustíme svislici na křivku zadaného tlaku v kondenzátu p_k a určíme velikost teoretické entalpie páry při výstupu z turbíny (vstup do kondenzátoru) i_k^{ad} . Průsečík křivky tlaku páry v kondenzátoru p_k a suchosti páry x je hodnota skutečné entalpie páry do kondenzátu i_k . Na základě znalosti velikosti tlaku v kondenzátoru p_k určíme entalpii kondenzátu i_{ko} .



Obr. 2.2 Mollierův i-s diagram vodní páry



Tepelná účinnost skutečného cyklu (pochodu):

Tepelná účinnost na spojce:

Účinnosť na svorkách generátoru (alternátoru):

Celková účinnosť elektrárny:

16

Tepelná účinnost ideálního cyklu (skutečný polytropický děj je nahrazen adiabatickým dějem):

$$\eta_t^{el} = \frac{i_p - i_k^{ad}}{i_p - i_{ko}} \quad [-; \text{kJ.kg}^{-1}, \text{kJ.kg}^{-1}] \quad (2.5)$$

Termodynamická účinnost (tzv. tepelná účinnost turbíny):

$$\eta_{td} = \frac{i_p - i_k}{i_p - i_k^{ad}} \quad [-; \text{kJ.kg}^{-1}, \text{kJ.kg}^{-1}] \quad (2.6)$$

Tepelná účinnost skutečného cyklu lze vypočítat i jako:

$$\eta_t = \eta_t^{ad} \cdot \eta_{td} \quad [-; -, -] \quad (2.7)$$

Tepelná bilance elektrárny (odpovídá množství tepla odebraného turbínou páře):

$$M = \frac{3600 \cdot P_{el}}{(i_p - i_k) \cdot \eta_m \cdot \eta_g} \quad [\text{t.h}^{-1}; (\text{s.h}^{-1}), \text{MW}, \text{kJ.kg}^{-1}] \quad (2.8)$$

Spotřeba tepla pro turbínu (množství tepla neseného pracovním médiem na vstupu turbíny):

$$Q^e = M \cdot (i_p - i_{ko}) \quad [\text{GJ.h}^{-1}; \text{t.h}^{-1}, \text{MW}, \text{kJ.kg}^{-1}] \quad (2.9)$$

Spotřeba tepla celková (množství tepla dodávané systému v palivu):

$$Q^{el} = \frac{Q^e}{\eta_{kot} \cdot \eta_{pot}} \quad [\text{GJ.h}^{-1}; \text{GJ.h}^{-1}, -] \quad (2.10)$$

Spotřeba paliva:

$$M_u = \frac{Q^{el}}{k_v} \quad [\text{t.h}^{-1}; \text{GJ.h}^{-1}, \text{MJ.kg}^{-1}] \quad (2.11)$$

Pokud výše uvedené hodnoty vztáhneme k elektrickému výkonu elektrárny, získáme měrné hodnoty spotřeby tepla, páry a paliva.

Měrná spotřeba páry pro turbínu:

$$m = \frac{M}{P_{el}} \quad [\text{t.(MWh)}^{-1}; \text{t.h}^{-1}, \text{MW}] \quad (2.12)$$

Měrná spotřeba tepla pro turbínu:

$$q^e = \frac{Q^e}{P_{el}} \quad [\text{GJ.(MWh)}^{-1}; \text{GJ.h}^{-1}, \text{MW}] \quad (2.13)$$

Měrná spotřeba tepla celková:

$$q^{el} = \frac{Q^{el}}{P_{el}} \quad [\text{GJ} \cdot (\text{MWh})^{-1}; \text{GJ} \cdot \text{h}^{-1}, \text{MW}] \quad (2.14)$$

Měrná spotřeba paliva:

$$m_u = \frac{M_u}{P_{el}} \quad [\text{t} \cdot (\text{MWh})^{-1}; \text{t} \cdot \text{h}^{-1}, \text{MW}] \quad (2.15)$$

2.1.1.3 Výpočet ztrát pro vykreslení Sankeyova diagramu:

Ztráty na:

$$\text{kotli} \quad q'_{kot} = 1 - \eta_{kot} \quad [-; -, -] \quad (2.16)$$

$$\text{potrubí} \quad q'_{pot} = (1 - \eta_{pot}) \cdot \eta_{kot} \quad [-; -, -] \quad (2.17)$$

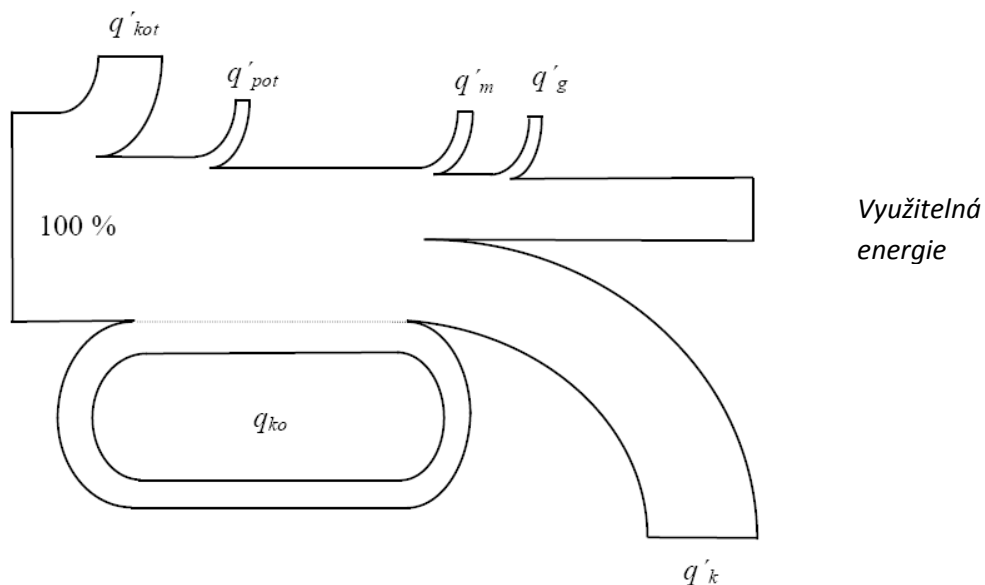
$$\text{kondenzátoru} \quad q'_k = (1 - \eta_t) \cdot \eta_{kot} \cdot \eta_{pot} \quad [-; -, -]$$

$$\text{turbíně} \quad q'_m = (1 - \eta_m) \cdot \eta_{kot} \cdot \eta_{pot} \cdot \eta_t \quad [-; -, -] \quad (2.18)$$

$$\text{generátoru} \quad q'_g = (1 - \eta_g) \cdot \eta_{kot} \cdot \eta_{pot} \cdot \eta_t \cdot \eta_m \quad [-; -, -] \quad (2.19)$$

$$\text{účinnost celkem} \quad \eta_t^{el} = 100 - q'_{kot} - q'_{pot} - q'_k - q'_m - q'_g \quad [-; -, -, -, -, -] \quad (2.20)$$

$$\text{Obíhající teplo} \quad q_{ko} = \frac{i_{ko} \cdot \eta_{kot} \cdot \eta_{pot}}{i_p - i_{ko}} \quad [-; \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}, -, \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (2.21)$$



Obr.2.4 Sankeyův diagram soustrojí s kondenzační (expanzní) turbínou.

[3] [6]

2.1.2 Ztráty korónou: venkovní vedení vvn, zvn

Při rozboru technických ztrát na venkovním vedení vvn a zvn je nutno brát v potaz ztráty korónou. Tyto ztráty způsobuje samostatný jednopólový temně fialový výboj, doprovázený praskavým a bzučivým zvukem. Podstatný vliv na tyto ztráty mají atmosférické podmínky.

2.1.2.1 Definice koróny

U elektrod vznikající samostatný neúplný výboj nazýváme koróna. Tento výboj vzniká tehdy, mají-li elektrody malý poloměr zakřivení a je-li vzdálenost mezi elektrodami poměrně veliká. Kolem elektrod vzniká velká intenzita nehomogenního pole, avšak v ostatním prostoru mezi elektrodami je intenzita pole poměrně malá.

Postupným zvyšováním napětí na konci elektrod dosáhne intenzita pole takových hodnot, které vyvolají nárazovou ionizaci. Díky tomuto se vytvoří podmínky vhodné pro vznik neúplného výboje, které jsou omezeny tenkou vrstvou vzduchu, přiléhajícímu k elektrodám. Výboje je možno na povrchu elektrod pozorovat zrakem v podobě slabě svítící vrstvy, tzv. obalová koróna, která je případně doprovázena zvukovým efektem. Ve skutečnosti je průměr koróny asi 1,9x větší než průměr, který můžeme spatřit pouhým okem, protože neviditelnou částí vyzařovaného spektra je ultrafialové záření. Kritické napětí U_k je ovlivněno povětrnostními podmínkami, drsností povrchu vodičů a vzájemnou vzdáleností či poloměrem zakřivení elektrod.

Rozhodující vliv na počáteční stádium koróny má stav povrchu elektrod. Drobné nečistoty a nerovnosti povrchu způsobují, že ohniska malých výbojů jsou nestabilní a stanovení napětí U_k , při kterém koróna vzniká, je obtížné. Proto je kritické napětí možno definovat jen pro ideální hladké vodiče.

Koróna má nejenže vliv na přenosové ztráty, které jsou menší než $1 \text{ kW} \cdot \text{km}^{-1}$, ale má za následek rušení telekomunikačních zařízení. Výhodou koróny je, že snižuje přepětíové vlny, které se šíří po vedení od místa zásahu atmosférickým výbojem.

2.1.2.2 Využití koróny

Technicky lze fenoménu koróny využít v elektrostatických odlučovačích, pro odlučování tuhých a kapalných částic (uhelného, kychtového a cementového prachu, popílku či olejové mlhy) ze vzduchu, kouřových nebo jiných plynů. Tyto odlučovače se používají vesměs tam, kde je zapotřebí zabránit znečišťování vzduchu v uzavřených prostorech nebo ovzduší v atmosféře.

2.1.2.3 Údaje potřebné pro výpočet ztrát korónou

Základní činitel, který ovlivňuje korónu, je intenzita pole na povrchu fázových vodičů. I u dokonale hladkých vodičů není kvůli prostorovému uspořádání fází povrchová intenzita pole ve všech bodech obvodu fázového vodiče konstantní. Tento maximální gradient je rozhodující při vzniku koróny a dle něj můžeme posoudit, zda bude mít koróna rušivé vlivy na rádiový přenos. Výpočty ztrát koróny se vztahují ke střední hodnotě povrchové intenzity pole, protože wattové ztráty, které koróna způsobuje, jsou dány součtem unikající energie po celém vodiči. Dále mají vliv na ztráty korónou atmosférické vlivy a stav povrchu vodičů.

Mezi atmosférické vlivy patří: - teplota

- tlak
- vlhkost
- mlha
- jinovatka
- déšť
- sníh

Stav vodičů ovlivňuje: - různá mechanická poškození

- mastnota
- koroze

2.1.2.4 Výpočet ztrát způsobených korónou:

Výpočet relativní hustoty vzduchu:

$$\delta = \frac{p}{101,3} \cdot \frac{273 + 20}{273 + v} \quad [-; \text{kPa}, ^\circ\text{C}] \quad (2.22)$$

δ	relativní hustota vzduchu vzhledem k teplotě 25 °C při tlaku 101,324 kPa [-]
p	tlak vzduchu [kPa]
v	teplota vzduchu [°C]

Vzorec výpočtu ekvivalentního poloměru pro n-svazek:

$$r_e = \sqrt[n]{r \cdot a} \quad [\text{cm}; \text{cm}, \text{cm}] \quad (2.23)$$

r_e	ekvivalentní poloměr svazkového vodiče [cm]
n	počet vodičů ve svazku [-]
r	poloměr vodičů [cm]
a	vzdálenost vodičů ve svazku [cm]

Vzorec pro výpočet středních vzdáleností vodičů - stožár typu PORTÁL:

$$d = \sqrt[3]{d_{12} \cdot d_{23} \cdot d_{13}} \quad [\text{m}] \quad (2.24)$$

Vzorec pro počáteční napětí koróny:

$$U_0 = 21,1 \cdot \delta \cdot m_1 \cdot m_2 \cdot r \cdot \ln \frac{d}{r} \quad [\text{kV}] \quad (2.25)$$

δ relativní hustota vzduchu [-]
 m_1 součinitel kvality povrchu vodiče [-] (*od 1 do 0,82 závisí na konstrukci vodiče*)
 m_2 součinitel respektující vliv počasí [-] (*1 pro suché, 0,8 pro deštivé a vlhké počasí*)

Ztráty způsobené korónou dle Peekova vzorce:

$$\Delta P_k = k \cdot (U - U_0)^2 \cdot 10^{-5} \quad [\text{W} \cdot \text{km}^{-1}; \text{kV}] \quad (2.26)$$

U fázová hodnota napětí [kV]

kde

$$k = \frac{241}{\delta} \cdot (f + 25) \cdot \sqrt{\frac{r}{d}} \quad [\text{Hz}, \text{m}, \text{m}] \quad (2.27)$$

Postup výpočtu ztrát korónou dle Petersonova vzorce:

$$U_0 = 21,1 \cdot \delta \cdot m_1 \cdot m_2 \cdot r \cdot \ln \frac{d}{r} \quad [\text{kV}; \text{cm}, \text{cm}, \text{cm}] \quad (2.28)$$

$$\Delta P = \frac{112 \cdot f \cdot U^2 \cdot F \cdot 10^{-6}}{\left(\ln \frac{d}{r} \right)^2} \quad [\text{kW} \cdot \text{km}^{-1}] \quad (2.29)$$

kde

$$F = \frac{U}{U_0} + 2 \cdot \ln \frac{U}{U_0} - 1 \quad [-] \quad (2.30)$$

d střední geometrická vzdálenost vodičů [cm]

f kmitočet [Hz]

U	fázová hodnota napětí [kV]
U_0	počáteční napětí koróny [kV]
F	koefficient [-]
δ	relativní hustota vzduchu [-]
r	poloměr vodiče [cm]

Pozn. Dle literatury [18] jsou u vedení 110kV s průřezem 95mm² ztráty korónou zanedbatelné.

[7] [8] [11]

2.1.3 Ztráty svodem a dielektrické ztráty: na všech napěťových úrovních podle druhu vedení

2.1.3.1 Ztráty svodem

Ztráty způsobené svodem jsou jedním z charakteristických parametrů vedení vvn a zvn. Jelikož žádný izolant nemá nekonečně velký izolační odpor, propustí po svém povrchu kvůli vodivosti svého materiálu určitý proud. Tento jev nazýváme svod. Hodnoty ztrát svodem jsou též velmi závislé na počasí.

Všeobecný vztah pro svodový proud:

$$I = \frac{U_f}{R_i} = U_f \cdot G \quad [A; V; \Omega; V; S] \quad (2.31)$$

kde

$$G = \frac{1}{R_i} \quad [S; -; \Omega] \quad (2.32)$$

U_f	napětí vůči zemi [V]
R_i	odpor izolace [Ω]
G	vodivost izolace [S]

Vyjádření svodových ztrát na kilometr vedení:

$$\Delta P_s = 3 \cdot U_f^2 \cdot G_s = U_s^2 \cdot G_s \quad [W.km^{-1}; V; S.km^{-1}] \quad (2.33)$$

kde

ΔP_s	svodové ztráty [W.km ⁻¹]
U_f	fázové napětí [V]
U_s	sdružené napětí [V]
G_s	svodová vodivost [S.km ⁻¹]

a odtud svodová vodivost

$$G_s = \frac{\Delta P_s}{U_s^2} \quad [\text{S.km}^{-1}; \text{W.km}^{-1}, \text{V}] \quad (2.34)$$

kde

G_s	svodová vodivost [S.km ⁻¹]
ΔP_s	svodové ztráty [W.km ⁻¹]
U_s	sdružené napětí [V]

Ztráty svodem mají činný charakter, dají se těžko vypočítat a podílí se nezanedbatelnou částí na technických ztrátách. U venkovních vedení jsou ztráty svodem převážně způsobeny mechanickým znečištěním izolátorů, vlhkem, deštěm, znečištěním izolátorů povrchovým výbojem, korónou, špatnou či nedokonalou izolací. Tato nedokonalá izolace může být způsobena tenkou vrstvou nečistot, které ulpívají na izolátorových závěsech. Ke zvýšení elektrických ztrát dochází v okamžiku, kdy nečistoty způsobí tok svodových proudů přes izolátory a sloupy do země. Faktory ovlivňující čistotu izolátoru jsou: výskyt průmyslové činnosti v dané lokalitě, čistota ovzduší a velký význam mají též atmosférické vlivy. Za vlhka je minimální vyžadovaný izolační odpor u venkovních vedení nn 24kΩ.km⁻¹, u vedení nad 20kV alespoň 1,6 MΩ.km⁻¹.

K výpočtu ztrát svodovými proudy je zapotřebí určit oblast znečištění, která je dána normou ČSN 330405. Z oblasti znečištění lze určit pomocí normy měrnou povrchovou vodivost. Tuto veličinu je však možné získat dopočtem na základě měřených hodnot. V praxi se provádí měření hodnot svodových proudů v laboratořích vvn. Více informací k této problematice je v literatuře [8].

Tab. 2.1 Informativní hodnoty svodové vodivosti podle úrovně napětí dle literatury [11]

U [kV]	G [S.km ⁻¹]
110	(3,6 – 5).10 ⁻⁸
220	(2,5 – 3,6).10 ⁻⁸
400	(1,4 – 2).10 ⁻⁸
750	(1,3 – 2,5).10 ⁻⁸
1150	(1,0 – 2).10 ⁻⁸

Tab. 2.2 Ztráty svodem na kilometr délky vedení dle literatury [8]

napětí [kV]	110	220	400
svodové ztráty [W.km ⁻¹]	70 - 3600	120 - 770	160 – 1400

Tab. 2.3 Bilancování průměrných ztrát svodem dle literatury [18]

druh vedení	vvn	vn	nn
ztráty svodem [kWh/km.rok]	9500	800	30

[7] [8] [9] [18]

2.1.3.2 Ztráty v dielektriku

Ztráty svodem u kabelových vedení jsou způsobeny zejména ztrátami v dielektriku. Tyto ztráty se uvažují v rozvodu všech napěťových úrovní. Vztah pro nabíjecí proud protékající kabelem na vzdálenost jednoho kilometru je:

$$I_0 = \frac{U_f}{X_c} = U_f \cdot \omega \cdot C = U_f \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot 10^3 \quad [\text{A.km}^{-1}] \quad (2.35)$$

Po dosazení za nabíjecí proud je možno vypočítat činné ztráty v dielektriku:

$$\Delta P_{diel} = U_f^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot \text{tg} \delta \cdot 10^3 \quad [\text{kW.km}^{-1}] \quad (2.36)$$

kde

U_f fázové napětí [kV]

X_c	kapacitní reaktance kabelu [$\Omega \cdot \text{km}^{-1}$]
C	kapacita kabelu [$\text{F} \cdot \text{km}^{-1}$]
δ	ztrátový úhel
ω	úhlová rychlost

Jednou z charakteristických veličin, určující kvalitu izolace, je ztrátový úhel δ . U pravidelně udržovaných kabelů by neměl přesáhnout hodnotu 4° .

U 3f. kabelového vedení délky L_K v km, provozovaného po dobu T hodin za rok (obvykle 8760), je možné spočítat ztráty elektrické energie dle vzorce:

$$W_{diel} = 3 \cdot P_{diel} \cdot L_K \cdot T \cdot 10^{-3} \quad [\text{MWh}] \quad (2.37)$$

Tab. 2.4 Průměrné dielektrické ztráty kabelů při hodnotě ztrátového úhlu $\delta=2^\circ$ na různých napěťových úrovních dle literatury [18]

napětí na 3f. kabelu [kV]	110	35	22	10	6	0,4
ztráty v dielektriku [kWh/km.rok]	175000	26000	14000	4500	1600	4

[7] [15] [18]

2.1.4 Ztráty transformátorů naprázdno: vznikající na všech transformačních úrovních

V rozvodné soustavě jsou transformátory nezanedbatelným spotřebičem elektrické energie, ať činného či jalového charakteru. Zejména zatížení jalovou spotřebou, se významně zvyšují ztráty v distribučních zařízeních vysokého napětí.

2.1.4.1 Činné ztráty transformátorů naprázdno

Ztráty způsobené hysterézními či vířivými proudy vznikající v železe (magnetickém obvodu) díky stálé změně magnetického toku. Vliv na tyto ztráty má: kmitočet, tvar magnetizační křivky, napětí, jakost plechů a magnetická indukce. Pro kmitočet 50Hz se tyto ztráty počítají z hmoty železa a spotřeby ve $\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}$, označujeme je ztrátovým číslem Δp_{10} pro indukci 1T nebo Δp_{15} pro indukci 1,5T. Tyto hodnoty jsou stejné při zatížení i při chodu transformátoru naprázdno a trvají po celou dobu, kdy je alespoň na jedné straně transformátoru připojeno napětí.

Činné ztráty transformátoru naprázdno se značí ΔP_0 a lze je určit dle následujícího vzorce:

$$\Delta P_0 = \Delta P_V + \Delta P_{hys} \quad [\text{kW}] \quad (2.38)$$

kde

ΔP_V ztráty vířivými proudy
 ΔP_{hys} ztráty hysterezí

Při průchodu proudu primárním vinutím je obvykle $R_0 \gg R_1$ proto:

$$\Delta P_0 = (R_1 + R_0) \cdot I_{10}^2 \quad [\text{kW}] \quad (2.39)$$

$$\Delta P_0 = \Delta P_{Fe} = R_0 \cdot I_{10}^2 \quad [\text{kW}] \quad (2.40)$$

$$\Delta P_0 = U_{10} \cdot I_{10} \cdot \cos \varphi_{10} \quad [\text{kW}] \quad (2.41)$$

kde

R_1 odpor primárního vinutí
 R_0 náhradní odpor primárního obvodu
 ΔP_{Fe} ztráty v železe (magnetickém obvodu)
 U_{10} napětí transformátoru naprázdno
 I_{10} proud transformátoru naprázdno
 $\cos \varphi_{10}$ účinník transformátoru naprázdno

Pro třífázový transformátor

$$\Delta P_0 = 3U_{10} \cdot I_{10} \cdot \cos \varphi_{10} \quad [\text{kW}] \quad (2.42)$$

2.1.4.2 Jalové ztráty transformátoru naprázdno

Nepatří do celkové bilance činných ztrát, avšak významnou mírou přispívají svým vlivem ke zvýšení činných ztrát ze strany vyššího napětí. Pokud provozujeme transformátor naprázdno, neprotéká jím čistě jalový proud I_0 , ale také proud I_{R0} kryjící ztráty v železe (magnetickém obvodu) a Jouleovy ztráty primárního vinutí.

Proud naprázdno tedy je:

$$I_0 = I_{R0} + jI_{L0} \quad [\text{A}] \quad (2.43)$$

kde

I_0 jalový proud
 I_{L0} magnetizační složka proudu naprázdno (kdy $I_{L0} \approx I_\mu$)
 I_{R0} proud kryjící ztráty v železe a Jouleovy ztráty (kdy $I_{R0} \ll I_{L0}$)

Složka I_{R0} se ve vektorovém součtu neuplatní, protože $I_{R0} \ll I_{L0}$. Proud naprázdno i_0 se udává v procentech jmenovitého proudu. Poté lze vypočítat jalový ztrátový výkon jako:

$$\Delta Q_0 = i_0 \cdot S_n \cdot 10^{-2} \quad [\text{kVar}] \quad (2.44)$$

kde

i_0 jmenovitý proud transformátoru naprázdno [%]
 S_n zdánlivý výkon transformátoru [kVar]

2.1.4.3 Tabulky orientačních hodnot jmenovitých ztrát naprázdno různých transformátorů

Tab. 2.5 Orientační hodnoty jmenovitých ztrát naprázdno u transformátorů vv/vn dle literatury [18]

S_n [MVA]	ΔP_0 [kW]
2	6,7
4	10,8
5	12,5
6,3	14,5
10	20,0

Tab. 2.6 Orientační hodnoty jmenovitých ztrát naprázdno u transformátorů vv/nn - s normálními plechy dle literatury [18]

S_n [kVA]	ΔP_0 [W]
50	420
100	670
160	950
250	1360
400	1800
630	2450
1000	3500

Tab. 2.7 Orientační hodnoty jmenovitých ztrát naprázdno u transformátorů vv/nn - s orientovanými plechy dle literatury [18]

S_n [kVA]	ΔP_0 [W]
50	160
100	240
160	320
250	445
400	650
630	910
1000	1120

[13] [15] [16]

2.1.5 Trvalá spotřeba měřících a řídicích prvků na všech úrovních soustav

V rozvodech elektrické energie můžeme nalézt velké množství měřících a řídicích prvků, které vlastní spotřebou způsobují ztráty elektrické energie. Spotřeba těchto zařízení je oproti jiným spotřebičům poměrně nízká, avšak vzhledem k počtu těchto nainstalovaných zařízení, které jsou navíc neustále zatíženy, se stává velmi významnou. Protože vlastní spotřeba těchto přístrojů není ve většině případů výrobcí uvedena, byla určena (dnes již zrušenou) vyhláškou Ministerstva průmyslu a obchodu č. 153/2001 Sb. velikost paušálních hodnot trvalých spotřeb měřících a řídicích prvků, jenž jsou používány v rozvodech elektrické energie.

2.1.5.1 Trvalá spotřeba měřících prvků

Uvažuje se v rozvodu všech napětových úrovní. Jedná se o spotřebu napětových a přepínacích cívek elektroměrů či kontrolních měřících přístrojů v transformacích a distribučních sítích.

Tab. 2.8 Průměrné příkony napětových a přepínacích cívek elektroměrů dle literatury [18]

Typ elektroměru	spotřeba napětové cívky [W]	spotřeba přepínací cívky [W]	spotřeba celkem [W]
1f. jednosazbový	1,44	0	1,44
1f. dvousazbový	1,44	1,2	2,64
3f. jednosazbový	3x1,44	0	4,32
3f. dvousazbový	3x1,44	1,2	5,52

V provozní oblasti je možné vypočítat roční ztráty dle vzorce:

$$W_{Zt} = (N_{E31} \cdot P_{Zt31} + N_{E32} \cdot P_{Zt32}) \cdot 8,76 \cdot 10^{-3} \quad [\text{MWh}] \quad (2.45)$$

kde

N_{E31} počet jednosazbových 3 fázových elektroměrů v provozní oblasti
 N_{E32} počet dvousazbových 3 fázových elektroměrů v provozní oblasti

V obchodní oblasti je možné vypočítat roční ztráty dle vzorce:

$$W_{Zo} = (N_{E11} \cdot P_{Zt11} + N_{E12} \cdot P_{Zt12} + N_{E31} \cdot P_{Zt31} + N_{E32} \cdot P_{Zt32}) \cdot 8,76 \cdot 10^{-3} \quad [\text{MWh}] \quad (2.46)$$

kde

N_{E11} až N_{E32} počty jednotlivých typů odběratelských elektroměrů v oblasti

Paušálně vyjádřeno hodnotou 25MWh/1000ks měření za rok.

2.1.5.2 Trvalá spotřeba řídicích prvků

Má uplatnění v rozvodech vn a nn. Představuje spotřebu přepínacích hodin a přijímačů HDO.
 Trvalé hodnoty příkonů pro přepínací hodiny jsou $P_{ZPH}=1,5\text{W}$ a pro přijímače HDO $P_{ZHDO}=2\text{W}$.

Výpočet roční ztráty elektrické energie v oblasti obchodní:

$$W_{Zo} = (N_{PH} \cdot P_{ZPH} + N_{HDO} \cdot P_{ZHDO}) \cdot 8,76 \cdot 10^{-3} \quad [\text{MWh}] \quad (2.47)$$

kde

N_{PH} počty přepínacích hodin
 N_{HDO} počty přijímačů HDO

Paušálně vyjádřeno hodnotou 10MWh/1000ks ročně.

[17] [18]

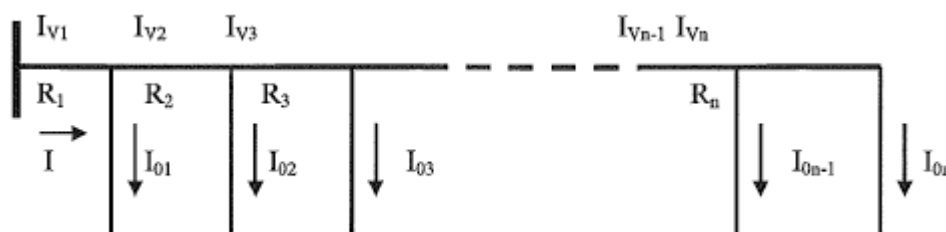
2.2 Ztráty technické proměnné

2.2.1 Jouleovy ztráty vedení

Jouleovy ztráty vedení se uplatňují na všech úrovních napětí. V provozní oblasti jde o nejvýznamnější ztráty. Tyto ztráty se určují pomocí dálkových měření elektroenergetických veličin na uvažované síti v reálném čase a v patřičné kvalitě i kvantitě. Naměřené hodnoty jsou archivovány po hodinových intervalech po celé uvažované období. Tyto hodnoty slouží k výpočtům ustáleného chodu sítě či pro výpočet ztrát.

Vzorec pro ztráty třífázového vedení s obecně rozloženými odběry náhodné velikosti:

$$\Delta P_V = 3 \cdot [R_1 \cdot I^2 + R_2 \cdot (I - I_{01})^2 + R_3 \cdot (I - I_{01} - I_{02})^2 + \dots + R_n \cdot I_{0n}^2] \quad [\text{MW}] \quad (2.48)$$



Obr.2.5 třífázové vedení s obecně rozloženými odběry

V případě nahrazení proudů odběrů proudy v jednotlivých úsecích vznikne vztah:

$$\Delta P_V = 3 \cdot (R_1 \cdot I_{V1}^2 + R_2 \cdot I_{V2}^2 + R_3 \cdot I_{V3}^2 + \dots + R_n \cdot I_{Vn}^2) \quad [\text{MW}] \quad (2.49)$$

$$\Delta P_V = \sum_{i=1}^n R_i \cdot I_{Vn}^2 \quad [\text{MW}] \quad (2.50)$$

Při vedení zatíženém jedním odběrem na konci nabývá tento výraz maximální hodnoty pro $n=1$:

$$\Delta P_V = 3 \cdot R \cdot I^2 \quad [\text{MW}] \quad (2.51)$$

Vztah pro obecně rozložené odběry náhodné velikosti:

$$\Delta P_V = k_Z \cdot R \cdot I^2 \quad [\text{MW}] \quad (2.52)$$

kde

k_Z činitel zatížení (může nabývat hodnot v intervalu $\langle 0;3 \rangle$)

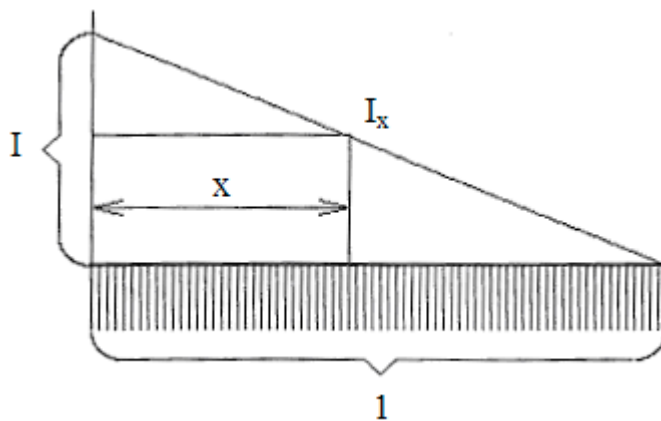
Činitel zatížení říká, kolikrát jsou výkonové ztráty ve vedení větší (při rozložení odběrů a jejich daných velikostech) oproti vedení zatíženém rovnoměrnými odběry.

Hodnota činitele zatížení je dána vztahem:

$$k_z = \frac{3 \cdot \sum_{i=1}^n R_i \cdot I_{Vn}^2}{R \cdot I^2} \quad [-] \quad (2.53)$$

Pozn. Jmenovatel znázorňuje ztrátu činného výkonu třífázového rovnoměrně zatíženého vedení.

Případ rovnoměrně zatíženého vedení je na obrázku (2.6)



Obr.2.6 rovnoměrně zatížené vedení

Je-li proud ve vzdálenosti x od začátku vedení, tak platí:

$$I_x = \frac{I \cdot (l - x)}{l} \quad [A] \quad (2.54)$$

Odvození činných ztrát:

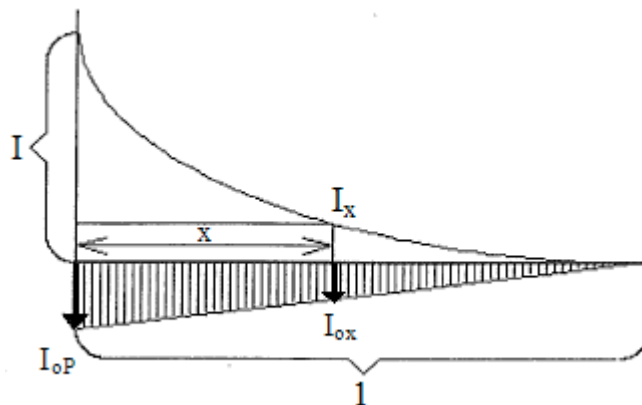
$$\Delta P_V = 3 \cdot \int_0^l \left[\frac{I(l-x)}{l} \right]^2 \cdot r \cdot dx = 3 \cdot \left(\frac{I}{l} \right)^2 \cdot \int_0^l (l^2 - 2lx + x^2) dx = I^2 \cdot l \cdot r = I^2 \cdot R \quad [MW] \quad (2.55)$$

kde

l délka vedení
 r měrný odpor
 I celkový proud

$k_R = 1$ činitel zatížení pro tento případ (kde R je index pro rovnoměrný odběr)

Na obrázku (2.7) je znázorněn případ, kdy velikost elementárních odběrů podél vedení klesá až k nule na konci vedení. Tato situace může nastat u nově navrhovaných distribučních sítí. Transformace z vyššího napětí je umístěna ve středu největších odběrů, méně významné odběry případnou na konec vývodů.



Obr.2.7 Znázornění vedení s lineárně klesajícími odběry směrem ke konci vedení

Vztah pro velikost odběru na začátku vedení:

$$I = \frac{(I_{oP} \cdot l)}{2} \Rightarrow I_{oP} = \frac{2 \cdot I}{l} \quad [A] \quad (2.56)$$

Vztah, z něhož vyplývá velikost odběru ve vzdálenosti x od počátku vedení:

$$\frac{I_{ox}}{I_{oP}} = \frac{l-x}{l} \Rightarrow I_{ox} = \frac{I_{oP} \cdot (l-x)}{l} = \frac{2 \cdot I(l-x)}{l^2} \quad [A] \quad (2.57)$$

Vztah pro proud tekoucí místem x ve vedení:

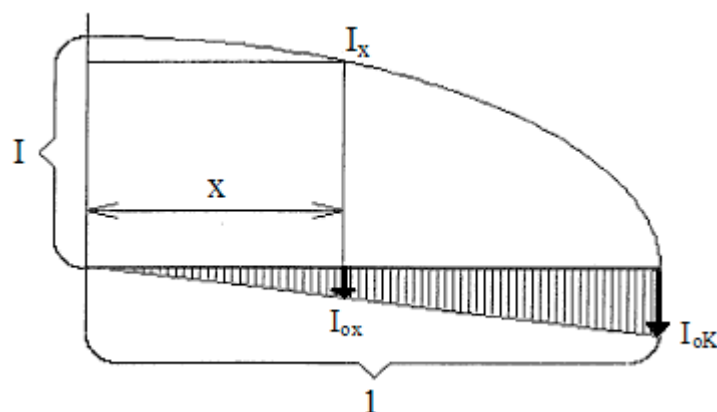
$$I_x = \frac{I_{ox} \cdot (l-x)}{2} = \frac{I \cdot (l-x)}{l^2} \quad [A] \quad (2.58)$$

Vztah pro velikost ztraceného výkonu je:

$$\Delta P_V = 3 \cdot \int_0^l \left[\frac{I(l-x)}{l^2} \right]^2 \cdot r \cdot dx = 3 \cdot \left(\frac{I}{l^2} \right)^2 \cdot \int_0^l (l-x)^4 dx = \frac{3}{5} \cdot I^2 \cdot l \cdot r = 0,6 \cdot I^2 \cdot R \quad [MW] \quad (2.59)$$

$k_K = 0,6$ činitel zatížení pro tento případ (index K pro klesající odběr)

Na obrázku (2.8) je vidět případ s lineárně rostoucím odběrem směrem ke konci vedení:



Obr.2.8 Znázornění vedení s lineárně rostoucími odběry směrem ke konci vedení

Vztah pro velikost odběru na konci vedení:

$$I = \frac{(I_{oK} \cdot l)}{2} \Rightarrow I_{oK} = \frac{2 \cdot I}{l} \quad [A] \quad (2.60)$$

Vztah z něhož vyplývá velikost odběru ve vzdálenosti x od počátku vedení:

$$\frac{I_{ox}}{I_{oK}} = \frac{x}{l} \Rightarrow I_{ox} = \frac{I_{oK} \cdot x}{l} = \frac{2 \cdot I \cdot x}{l^2} \quad [A] \quad (2.61)$$

Vztah pro proud tekoucí místem x ve vedení:

$$I_x = I - \frac{I_{ox} \cdot x}{2} = \frac{I \cdot (l^2 - x^2)}{l^2} \quad [A] \quad (2.62)$$

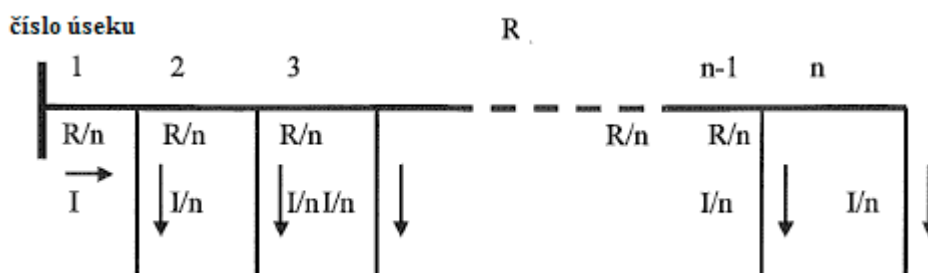
Vztah pro velikost ztraceného výkonu je:

$$\begin{aligned} \Delta P_V &= 3 \cdot \int_0^l \left[\frac{I \cdot (l^2 - x^2)}{l^2} \right]^2 \cdot r \cdot dx = 3 \cdot \left(\frac{I}{l^2} \right)^2 \cdot \int_0^l (l^2 - x^2)^2 dx = \\ &= \frac{8}{5} \cdot I^2 \cdot l \cdot r = 1,6 \cdot I^2 \cdot R \quad [MW] \end{aligned} \quad (2.63)$$

$k_S = 1,6$ činitel zatížení pro tento případ (index S pro klesající odběr)

U výše uvedeného případu je možno vidět, že činitel zatížení k_z nově vybudovaných distribučních sítí může dosahovat hodnot menších než 1. Zažitá hranice intervalu $k_z \in <0;3>$ je nadále platná pro starší síť.

Nejčastěji uvažovaný je výpočet homogenního vedení zatíženého konečným počtem n stejných, rovnoměrně rozložených odběrů dle obr. 2.9.



Obr.2.9 Homogenní vedení zatížené konečným počtem n stejných, rovnoměrně rozložených odběrů

Ztracený výkon pro tento případ:

$$\begin{aligned} \Delta P_V &= 3 \cdot \left\{ \left[\frac{I \cdot n}{n} \right]^2 \cdot \frac{R}{n} + \left[\frac{I \cdot (n-1)}{n} \right]^2 \cdot \frac{R}{n} + \dots + \left[\frac{I \cdot 2}{n} \right]^2 \cdot \frac{R}{n} + \left[\frac{I \cdot 1}{n} \right]^2 \cdot \frac{R}{n} \right\} = \\ &= 3 \cdot I^2 \cdot R \cdot \left[\frac{n^2}{n^3} + \frac{(n-1)^2}{n^3} + \dots + \frac{2^2}{n^3} + \frac{1^2}{n^3} \right] = \\ &= 3 \cdot I^2 \cdot \frac{R}{n^3} \cdot [1^2 + 2^2 + \dots + (n-1)^2 + n^2] \quad [kW] \end{aligned} \quad (2.64)$$

kdy v hranaté závorce je výraz součtu aritmetické řady druhého stupně, pro jehož omezený počet platí:

$$S_n = \frac{n \cdot (n+1) \cdot (2n+1)}{6} \quad [-] \quad (2.65)$$

Po úpravě a dosazení do výrazu pro ztracený výkon dostaneme:

$$P_V = I^2 \cdot R \cdot \frac{(n+1) \cdot (2n+1)}{2n^2} \quad [W] \quad (2.66)$$

$$\text{výraz} \quad \frac{(n+1) \cdot (2n+1)}{2n^2} = \frac{2n^2 + 3n + 1}{2n^2} = k_{Rn} \quad [-] \quad (2.67)$$

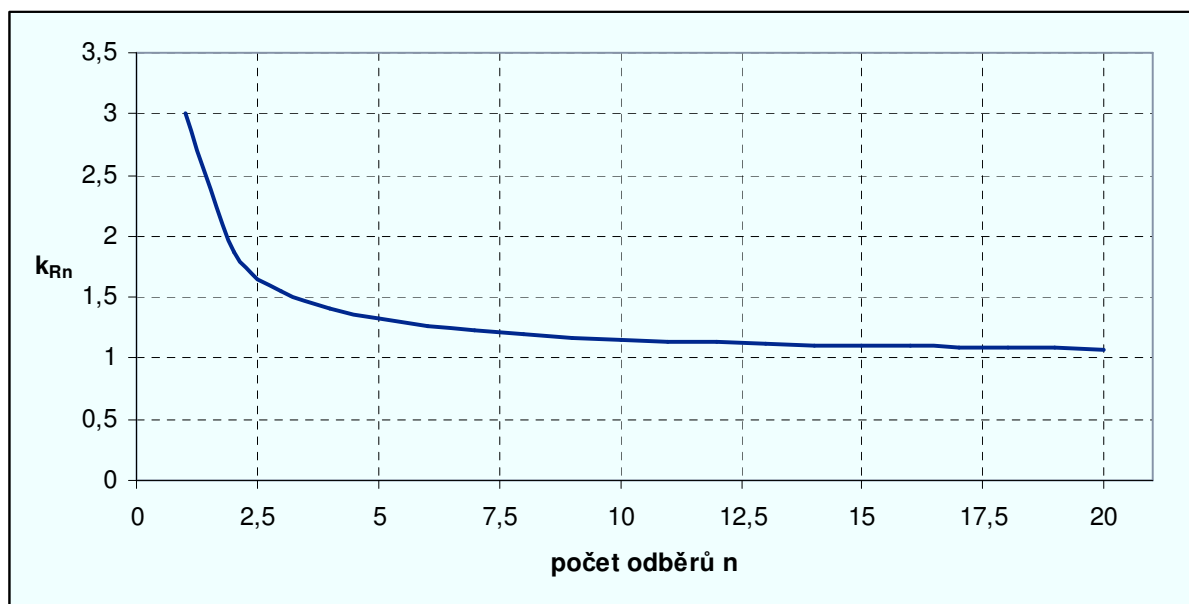
kde

k_{Rn} koeficient zatížení pro rovnoměrně zatížený počet n stejných odběrů

Tab. 2.9 Hodnoty činitele zatížení k_{Rn} dle literatury [15]

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
k_{Rn}	3	1,875	1,556	1,406	1,320	1,264	1,224	1,195	1,173	1,155
n	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
k_{Rn}	1,140	1,128	1,118	1,110	1,102	1,096	1,090	1,085	1,080	1,076

Graf 2.1 Hodnoty činitele zatížení k_{Rn} dle tab. (2.9)



[15] [16] [18]

2.2.2 Ztráty transformátorů nakrátko

Ztráty transformátorů nakrátko se uvažují na všech úrovních napěťových hladin.

2.2.2.1 Činné ztráty transformátorů nakrátko

Jsou to ztráty, které vznikají ve vinutí transformátoru průchodem proudu. Na tyto ztráty má tedy vliv průřez vinutí, materiál, zapojení vinutí a velikost proudu procházející vinutím.

Činné ztráty lze vypočítat dle vzorce:

$$\Delta P_k = \Delta P_{kn} \cdot \left(\frac{S_s}{S_n} \right)^2 \quad [\text{kW}] \quad (2.68)$$

kde

ΔP_{kn}	jmenovité ztráty nakrátko [W]
S_s	zdánlivý špičkový výkon transformátoru [kVA]
S_n	jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru [kVA]

Činné ztráty elektrické energie za určité sledované období T:

$$W_k = \Delta P_k \cdot \left(\frac{S_s}{S_n} \right)^2 \cdot T = \Delta P_k \cdot \beta^2 \cdot T_\Delta \quad (2.69)$$

kde

T_Δ	doba plných ztrát [hod]; (pozn. odvozená z dodané energie, špičkového zatížení a doby provozu)
β	zatěžovatel

2.2.2.2 Jalové ztráty transformátorů nakrátko

Nezařazují se do celkové bilance činných ztrát, avšak činné ztráty jsou jimi ovlivněny v návazném distribučním zařízení ze strany vyššího napětí, proto je s těmito ztrátami nutné počítat. Jalový výkon transformátoru nakrátko způsobuje ztráty vyvolané rozptylovou reaktancí vinutí.

Výpočet hodnot jmenovitého napětí nakrátko:

$$u_k = u_{pk} + ju_{Qk} \quad [\%] \quad (2.70)$$

kde

u_{pk}	činná složka jmenovitého napětí
ju_{Qk}	jalová složka jmenovitého napětí

Činná složka u_{pk} je proti jalové složce ju_{Qk} malá, ve vektorovém součtu se nedá uplatnit, proto se uvažuje, že $u_k \approx u_{Qk}$. Poté platí pro jmenovitý jalový ztrátový výkon nakrátko vztah:

$$\Delta Q_{kn} = \frac{u_k}{100} \cdot S_n \quad [\text{kVar}] \quad (2.71)$$

kde

u_k	jmenovité napětí nakrátko [%]
S_n	jmenovitý zdánlivý výkon [kVA]

Vztah pro celkový ztrátový výkon transformátoru nakrátko:

$$\Delta Q_k = \Delta Q_{kn} \cdot \left(\frac{S_s}{S_n} \right)^2 \quad [\text{kVar}] \quad (2.72)$$

kde

ΔQ_{kn} jmenovité ztráty nakrátko [kVar]

S_s zdánlivý špičkový výkon transformátoru [kVA]

S_n jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru [kVA]

2.2.2.3 Tabulky orientačních hodnot jmenovitých ztrát nakrátko různých transformátorů:

Tab. 2.10 Orientační hodnoty jmenovitých ztrát nakrátko u transformátorů vv/vn dle literatury [18]

S_n [MVA]	ΔP_k [kW]
2	23,5
4	39,0
5	45,5
6,3	53,0
10	76,0

Tab. 2.11 Orientační hodnoty jmenovitých ztrát nakrátko u transformátorů vv/nn - s normálními plechy dle literatury [18]

S_n [kVA]	ΔP_k [W]
50	1200
100	2130
160	3130
250	4450
400	7300
630	10000
1000	14200

Tab. 2.12 Orientační hodnoty jmenovitých ztrát nakrátko u transformátorů vv/nn - s orientovanými plechy dle literatury [18]

S_n [kVA]	ΔP_k [W]
50	1100
100	1750
160	2350
250	3250
400	4600
630	6500
1000	10500

[15] [16] [18]

2.2.3 Jouleovy ztráty přechodových odporů

Tyto ztráty jsou uvažovány v rozvodu na všech napěťových úrovních. Při řádném stavu a údržbě distribučních zařízení jsou tyto ztráty minimální a je možno je zanedbat. Největší vliv na ztráty přechodových odporů má stáří a stav zařízení a nelze je stanovit žádným výpočtem. Pro zahrnutí do výpočtu celkových ztrát musí být hodnoty těchto ztrát brány v úvahu alespoň v rozmezí 1-5 %:

1 % pro ztráty v sítích vvn

3 % pro ztráty v sítích vn

5 % pro ztráty v sítích nn

[15] [18]

2.2.4 Jouleovy ztráty jisticích prvků

Tyto ztráty se uvažují především v rozvodech nn, a to z důvodu velkého množství nainstalovaných pojistek a jističů. Funkční ztráty těchto prvků souvisí jak s činností provozní při jištění vývodů a přípojek, tak s činností obchodní při jištění elektroměrů. Maximální možné výkonové ztráty u pojistek a jističů jsou dány normou ČSN EN 60 898.

2.2.4.1 Ztráty pojistek a jističů instalovaných v síti

Vzorec pro výpočet ztráty jednoho pólu pojistky či jističe:

$$\Delta P_{Zt} = \Delta P_{Jn} \cdot i_p^2 \quad [\text{W}] \quad (2.73)$$

kde

ΔP_{Jn} výkonová ztráta jednoho pólu pojistky či jističe [W]
 i_p index maximálního zatížení [$I_{\max} \cdot I_n^{-1}$]

Činné ztráty jednopólové pojistky či jističe:

$$W_{Zt} = \Delta P_J \cdot T_z \cdot 10^{-3} \quad [\text{kWh} \cdot \text{rok}^{-1}] \quad (2.74)$$

kde

T_z doba plných ztrát příslušného zařízení za rok [h]

Činné ztráty třípólového jističe:

$$W_{Zt} = 3 \cdot \Delta P_J \cdot T_z \cdot 10^{-3} \quad [\text{kWh} \cdot \text{rok}^{-1}]$$

2.2.4.2 Ztráty jističů instalovaných před elektroměrem

Výpočet ztrát energie 1 fázových elektroměrů pro kategorii obyvatelstvo:

$$W_{Zt-I} = 0,153 \cdot (0,0749 \cdot 20 + 1,5348) \cdot 0,6^2 \cdot N_{E1} \quad (2.75)$$

kde

N_{E1} počet instalovaných 1 fázových elektroměrů

Výpočet ztrát energie 3 fázových elektroměrů pro kategorii obyvatelstvo:

$$W_{Zt-II} = 0,372 \cdot (0,0749 \cdot 32 + 1,5348) \cdot 0,7^2 \cdot (N_{E3} - N_{MOO} + N_{E3P} - N_{VO}) \quad (2.76)$$

kde

N_{E3} počet instalovaných 3 fázových elektroměrů

N_{E3P} počet instalovaných 3 fázových převodových elektroměrů

N_{MOO} počet odběratelů v kategorii maloodběr pro obyvatelstvo

N_{VO} počet odběratelů v kategorii velkoodběru

Výpočet ztrát energie 3 fázových elektroměrů pro kategorii podnikatel:

$$W_{Zt-III} = 1,422 \cdot (0,0749 \cdot 40 + 1,5348) \cdot 0,8^2 \cdot (N_{MOP} + N_{E3P} - N_{VO}) \quad (2.77)$$

kde

N_{MOP} počet odběratelů v kategorii maloodběr pro podnikatele

Výpočet celkových ročních ztrát elektrické energie:

$$W_{ZtC} = (W_{Zt-I} + W_{Zt-II} + W_{Zt-III}) \cdot 10^{-3} \quad [\text{MWh}] \quad (2.78)$$

Paušální hodnota pro ztráty na pojistkách a jističích je ročně na sítích nn 300MWh na 1000km.

[15] [18]

2.3 Ztráty netechnické:

2.3.1 Ztráty souvisejí s výkonem řídicí, kontrolní a obchodní činnosti

2.3.1.1 Paušální odběry

Paušální odběr nepatří mezi ztráty jako takové, jelikož spotřeba je řádně placena. Při řešení ztrát je však tato položka často opomíjena.

2.3.1.1.1 Paušální odběry lze dělit na

- neměřené odběry: jízdenkové a telefonní automaty, zabezpečovací zařízení českých drah apod. K placení těchto odběrů slouží stálá měsíční sazba za každých započatých 10W instalovaného příkonu.
- speciální neměřené odběry: zařízení s minimálním příkonem jako požární a poplachové hlásiče. K placení těchto odběrů slouží stálá měsíční sazba, která se vztahuje na každé odběrné místo, kdy není přihlíženo k instalovanému příkonu, ale nesmí přesáhnout 1kW.

[15]

2.3.1.2 Nepřesnost měření

Změřené hodnoty elektrické energie jsou zatížené chybou měření. Ta je způsobena různými třídami přesnosti měření, nepřesností měřidel, nepřesností měřících převodníků, měřící metodikou a počtem elektroměrů na vstupech a výstupech z distribuční soustavy.

Vyčíslení rozdílu mezi dodanou a odebranou elektrickou energií (pro případ naprosto přesného měření) je:

$$W_z = W_D - W_O \quad [\text{MWh}] \quad (2.79)$$

kde

W_D	energie dodaná do sítě
W_O	energie naměřená u spotřebičů

[15] [16]

2.3.1.3 Vadná měření

Ztráty způsobené vadnými měřicími transformátory a elektroměry. Při tomto typu ztrát nedochází k obchodním ani bilančním ztrátám. Po zjištění vadného měření je odběr fakturován z průměrné hodnoty odběru předchozího období. Ztrátu v tomto případě způsobuje pouze nezjištěné vadné měření, kdy jejich podíl je 10 až 20% na zjištěných případech. Vada měření nemusí být 100%

ztrátou odebrané elektrické energie, protože většina poruch na třífázových měřeních je způsobena vadným měření jedné fáze - ztráty jsou tedy třetinové.

[15]

2.3.1.4 Nesoudobost odečtu měřidel

Ideální, avšak v praxi nerealizovatelný způsob odečtu, je odečet probíhající současně na všech elektroměrech od vstupu do distribuční soustavy, až po výstupy v jednotlivých napěťových hladinách a na přechodech mezi nimi, a to v době odpovídající stanovenému období pro vyhodnocování ztrát.

V praxi je nejmenší nesoudobost odečtu na vstupu do distribuční soustavy vvn. Větší je na jejím výstupu (vstupy do transformace vvn/nn, předací místa tranzitu či odběratelé), dále se zvyšuje s klesající napěťovou úrovní. Vzájemná nesoudobost odečtů na vstupech a výstupech z distribuční soustavy způsobuje chyby v celkovém přehledu opatřené a dodané energie.

[15] [16]

2.3.1.5 Změna nevyfakturované energie

Ztráty týkající se pouze distribuční soustavy nn. V tomto případě nejde o celkovou změnu nevyfakturované energie v určitém sledovaném roce, ale o odchylku hodnoty skutečné od hodnoty vypočítané.

[16]

2.3.1.6 Chybné odečty z měřidel

Odhad velikosti netechnických ztrát způsobených chybným odečtem je obdobný jako ztráty způsobené vadami měření.

- V kategorii velkoodběratelů je pravděpodobnost vadných odečtů minimální, navíc (pokud není odběratelem reklamován) je odečet eliminován správným odečtem v následujícím období.
- V kategorii maloodběratelů je rovněž chyba eliminována správným odečtem v následujícím období, jsou však ovlivněny ztráty ve sledovaném roce.

[16]

2.3.1.7 Přetočené elektroměry

Ztráty týkající se pouze distribuční soustavy nn. K neúmyslnému přetočení u pětímístného elektroměru může během roku dojít jen výjimečně (zcela vyloučeno u třífázového jističe do hodnoty 35A instalovaného před elektroměrem), u elektroměrů čtyřmístných může k této situaci dojít zcela běžně.

[15]

2.3.1.8 Nesprávné konstanty měření

Kategorie týkající se převodových (nepřímých) měření. U těchto odběrů nelze vzhledem k jejich velikosti (80A a výše) a hladině napětí zapojit elektroměr přímo do měřeného obvodu - vzniká nutnost použít měřicí transformátory proudu nebo napětí.

[15]

2.3.1.9 Vadná zapojení měření

Ztrátu elektrické energie způsobují v 10 až 20 % nezjištěná vadná zapojení. Toto vychází ze zjištěných počtů vadných měření v daném roce. Fakturace i celkový přehled přenesených energií jsou upraveny podle předchozích období.

2.3.1.9.1 Případy vadných zapojení měření

- při odpojení napěťové cívky elektroměru (většinou jedné fáze) - u jednofázového elektroměru dochází ke 100% ztrátám, u třífázového elektroměru dochází ke 33,3% ztrátám elektrické energie
- při záměně přívodu a odvodu napěťových cívek jedné fáze třífázového elektroměru dochází u symetrického zatížení ke dvoutřetinovým (tedy 66,7%) ztrátám
- při nedodržení sledu fází třífázového elektroměru dochází ke 100% ztrátě, elektroměr je nefunkční, netočí se. Praktický výskyt se nepředpokládá, protože se této chybě dá při kontrolním připojení předejít

[15]

2.3.1.10 Odběry pod hranicí citlivosti měření

Mezi tyto odběry mohou patřit: odběry termostatů ledniček, elektrických hodin, prostorových termostatů, povelové členy různých elektrospotřebičů, atd. Hranice citlivosti nových elektroměrů je asi 4W, hranice citlivosti starších elektroměrů je kolem 8W.

[16]

2.3.2. Ztráty způsobené neoprávněným odběrem elektrické energie z elektrizační soustavy

Neoprávněné odběry patří mezi jednu ze zásadních netechnických ztrát. Tyto ztráty jsou řešeny dle energetického zákona č. 458/2000 Sb. v platném znění, kde § 51 upravuje co je to neoprávněný odběr elektřiny z elektrizační soustavy.

2.3.2.1 Neoprávněným odběrem z elektrizační soustavy je:

- a) odběr bez uzavřené smlouvy, jejímž předmětem by byla dodávka elektřiny,
- b) odběr při opakovaném neplnění smluvených platebních povinností nebo platebních povinností vyplývajících z náhrady škody způsobené neoprávněným odběrem elektřiny, které nejsou splněny ani po upozornění,
- c) odběr bez měřicího zařízení, pokud odběr bez měřicího zařízení nebyl smluvně sjednán,
- d) připojení nebo odběr z té části zařízení, kterou prochází neměřená elektřina,
- e) odběr měřený měřicím zařízením které:
 - 1. nezaznamenalo odběr nebo zaznamenalo odběr nesprávně ke škodě výrobce elektřiny, obchodníka s elektřinou, provozovatele distribuční soustavy nebo provozovatele přenosové soustavy v důsledku neoprávněného zásahu do tohoto měřicího zařízení nebo do jeho součástí či příslušenství, nebo byly v měřicím zařízení provedeny takové zásahy, které údaje o skutečné spotřebě změnily,
 - 2. nebylo připojeno provozovatelem přenosové soustavy nebo provozovatelem distribuční soustavy,
 - 3. vykazuje chyby spotřeby ve prospěch zákazníka a na kterém bylo buď porušeno zajištění proti neoprávněné manipulaci nebo byl prokázán zásah do měřicího zařízení,
- f) odběr v přímé souvislosti s neoprávněným zásahem na přímém vedení či na zařízení distribuční soustavy nebo na zařízení přenosové soustavy,
- g) odběr elektřiny, kdy zákazník opakovaně bez vážného důvodu neumožnil přístup k měřicímu zařízení nebo neměřeným částem odběrného elektrického zařízení, přestože byl k umožnění přístupu za účelem provedení kontroly, odečtu, údržby, výměny či odebrání měřicího zařízení alespoň 15 dnů předem písemně nebo jiným prokazatelným způsobem vyzván.

2.3.2.2 Zákaz neoprávněných odběrů elektřiny z elektrizační soustavy

Obvykle nelze zpětně zjistit množství neoprávněně odebrané elektrické energie. Toto upravuje prováděcí předpis k energetickému zákonu vyhlášky 82/2011 Sb. v platném znění o měření elektřiny a o způsobu stanovení náhrady škody při neoprávněném odběru, neoprávněné dodávce, neoprávněném přenosu nebo neoprávněné distribuci elektřiny.

Velcí distributoři elektřiny v ČR mají skupinu pověřených pracovníků zabývajících prevencí, vyhledáváním a řešením neoprávněných odběrů.

2.3.2.3 Dělení neoprávněných odběrů:

- **Odběr s měřicím zařízením, bez platného smluvního vztahu**
- **Odběr s měřicím zařízením, kde jsou porušeny prostředky proti neoprávněné manipulaci**
- **Odběr bez měřicího zařízení (nebylo-li smluvně ujednáno)**
 - přesvorkování přívodu s vývodem mimo měřicí soustavu
 - neoprávněný odběr elektřiny dle ustanovení § 51 odst. 1 písm. c) EZ
- **Odběr z neměřené části zařízení distribuční soustavy**
 - neoprávněný odběr elektřiny dle ustanovení § 51 odst. 1 písm. d) EZ
 - přípojka nn
 - kmenové vedení (venkovní, kabelové)
 - naměřená část instalačního rozvodu
 - měřicí zařízení na odběrném místě, ale odběr mimo měřicí zařízení
- **Odběr prostřednictvím záměrně upraveného měřicího zařízení**
 - bez poškození PPNM, úředních značek a elektroměru
 - ovlivnění magnetickým polem
 - odpojení napájecí fáze
 - přerušení napěťových nebo proudových obvodů
 - bez poškození PPNM, úředních značek, poškozeno těleso elektroměru
 - brzdění kotouče cizím předmětem
 - bez poškození PPNM, poškozeny úřední značky případně těleso elektroměru
 - mechanické poškození - úprava elektroměru (mechanická nebo elektronická část měřidla)
 - přetočení číselníku
 - poškození úřední značky maskováno různými způsoby
 - bez poškození úřední značky a tělesa elektroměru, poškozeny PPNM
 - záměna přívodu a vývodu
 - přímé propojení přívodu a vývodu
 - sundané nebo izolované propojky - klemy
 - překlápění elektroměru
 - poškození PPNM maskováno různými způsoby

- **Poškození PPNM či provozní plomby**

Pouhé poškození provozní PPNM či provozní plomby se neřeší jako neoprávněný odběr, je nutný ještě jiný znak neoprávněného odběru.

- **Odběr z instalačního měřeného rozvodu jiného zákazníka**

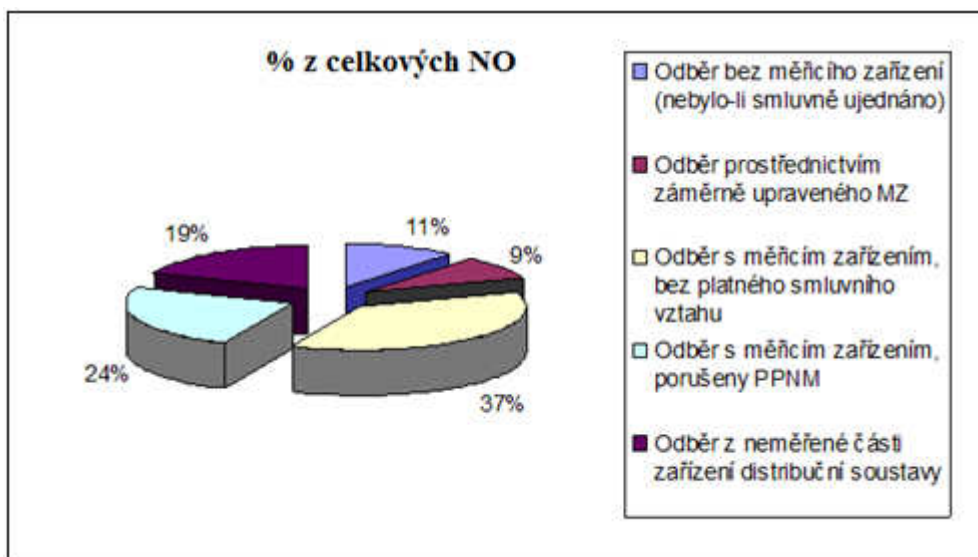
- společné prostory
- jiný objekt, sousední byt
- veřejné osvětlení

Neřeší se jako neoprávněný odběr s odůvodněním, že je to záležitost rozvodu majitele objektu, zákazník je odkázán na PČR, případně revizní techniky.

Tab. 2.13 Rozbor podle typů neoprávněných odběrů dle literatury [20]

Typ NO	% z celkových NO
Odběr bez měřicího zařízení (nebylo-li smluvně ujednáno)	11%
Odběr prostřednictvím záměrně upraveného MZ	9%
Odběr s měřicím zařízením, bez platného smluvního vztahu	37%
Odběr s měřicím zařízením, porušeny PPNM	24%
Odběr z neměřené části zařízení distribuční soustavy	19%

Graf 2.2 Typy neoprávněných odběrů dle tab. (2.13)



[20]

3. Možnosti snižování ztrát

Všeobecně jsou ztráty nežádoucí. Z hlediska technického je nelze úplně odstranit. Proto je snaha snížit je na co nejmenší míru. V podstatě existují dvě možnosti snižování ztrát. V prvním případě bude dosaženo snížení ztrát bez nároku na další investice a v případě druhém je možné snížení ztrát po technických úpravách, do kterých je dodatečně investováno.

3.1 Možnosti snižování ztrát s investičními nároky

Zkoumáním, vývojem a provozem se již od konce 18. století usilovalo o dosažení co nejvyšší účinnosti spalování uhlí, pro výrobu páry s vysokým tlakem a teplotou, což vedlo k přeměně tepelné energie v parním stroji či turbíně na energii mechanickou a v generátoru z energie mechanické na energii elektrickou. Zásadním problémem je poměr získané energie proti energetickému obsahu paliva, tzv. účinnost transformačního procesu. Výsledkem tohoto vývoje je dostat se za hranici 50% účinnosti energetického obsahu uhlí a zároveň snížit měrnou spotřebu paliva hledáním lepších a účinnějších metod spalování.

3.1.1 Integrace tlakového zplyňování uhlí a paroplynového cyklu

Integrace tlakového zplyňování uhlí a paroplynového cyklu je dnes nejvýhodnější způsob využití energetického uhlí. Paroplynový cyklus zajišťuje nejvyšší možnou účinnost přeměny. Zemní plyn je nahrazen horkým zplyněným uhlím, které pod tlakem uniká z uhelných zplyňovacích reaktorů. Při tomto procesu jsou z plynů odloučeny prachové částice, proběhne jeho odsíření a odstranění dalších škodlivin. Vyčištěný jde do spalovací turbíny, kde vyrábí elektrickou energii. Odpadním teplem z plynů, kombinovaným s teplem z reaktoru, jsou přehřívány vysokotlaké páry pro parní turbosoustroj.

Účinnost tohoto cyklu dosahuje více než 55 %. Při využití této technologie lze dosáhnout proti běžným tepelným elektrárnám snížení spotřeby vody a je vyprodukováno méně tuhých odpadů než u práškového topeniště či atmosférického fluidního kotle. Odpad je možno využít ve stavebnictví a zemědělství. Úroveň emisí SO_2 , NO_x a CO_2 je téměř o čtvrtinu snížena. S využitím nejmodernějších práškových ohnišť je o řád nižší než u zastaralých kondenzačních elektráren.

Snaha o stále nižší emise a navyšování účinnosti vede k zvyšování teplot spalování, což má za následek vývoj systémů využívajících uhlí dvoufázově:

první fáze: uhlí je zplyněno a energie je užita ve vysokoteplotních spalovacích turbínách

druhá fáze: v samostatném fluidním ohništi je spalován koksový zbytek ze zplyňovacího procesu a teplo je zužitkováno v konvenčním parním oběhu. Tento proces lze kombinovat i s oběhy spalující uhlí a zemní plyn.

3.1.2 Zplyňování uhlí

Samostatným oborem se staly mezinárodní programy čistého využití uhlí, tzv. „Clean Coal Technology“, opírající se o zplyňovací reaktory a využití horkého plynu v paroplynovém cyklu. Ke zplyňování uhlí dochází pod tlakem, obvykle v kontaktu s kyslíkem nebo parou. Vzniklý plyn má velký obsah CO a H₂.

3.1.2.1 Nejvíce propagované technologie zplyňování:

- zplyňování v sesuvném loži
- fluidní zplyňování
- hořákové zplyňování

3.1.3 Trendy vývoje vedoucí ke snižování ztrát

3.1.3.1 Parní turbíny

Při nadkritických parametrech teploty a tlaku páry (600 °C, 22,1 MPa) je možno dosáhnout účinnosti nad 40 %. Vyvíjené monokrystalické slitiny pro turbíny umožní jít až do oblasti ultrakritické páry s teplotou 700 °C, kdy by účinnost mohla ve špičkách dosahovat až k 50 %.

3.1.3.2 Fluidní spalování

K dosažení až 50% účinnosti těchto systémů vede přechod z atmosférických na tlaková fluidní ohniště, v kombinaci s paroplynovým cyklem.

3.1.3.3 Plynové turbíny

Pokroky ve spalování zemního plynu lze očekávat do 30 let, kdy by účinnost mohla dosáhnout až 47-50 % (pokud bude možno díky materiálu dosáhnout vstupní teploty 1300 - 1500°C).

3.1.3.4 Přímá přeměna chemické energie paliva v elektřinu

Tento proces se odehrává za vysokých teplot v palivových článcích. Ty mohou v kombinaci se zplyňovacím cyklem dosáhnout až 50% účinnosti.

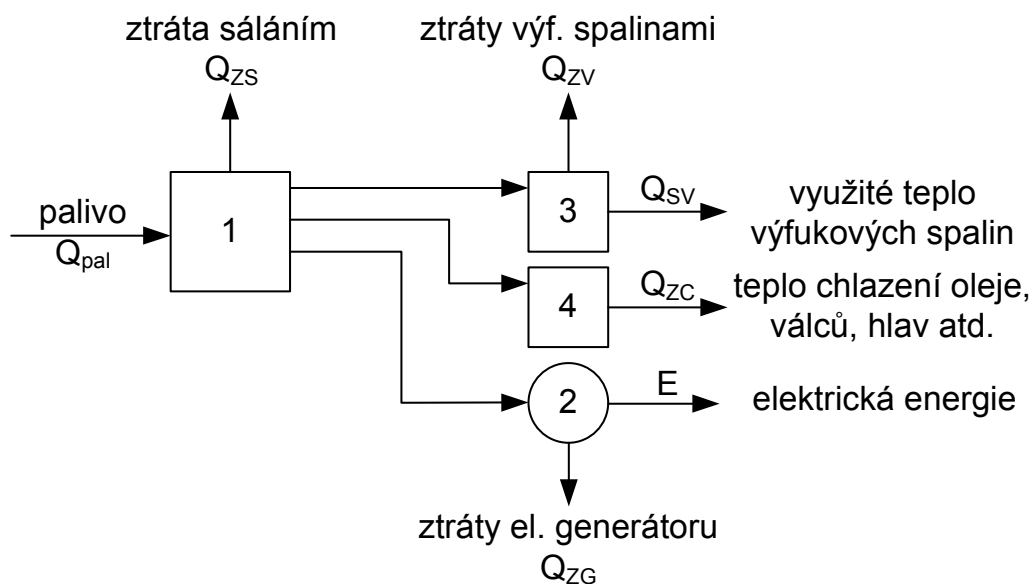
3.1.3.5 Magnetohydrodynamické generátory

Generátory vyvíjené přes 40 let, ve kterých je hořící uhlý prach nebo plyn doplněn ionizačními přísadami, jež průchodem magnetickým polem rozštěpí svoje částice podle náboje. Na elektrodách, které jsou uloženy kolmo na směr proudu a magnetického pole, lze odebírat elektrický proud. Teplem, které využijeme ze spalin v nadkritickém parním cyklu, je možné dosáhnout až 60% účinnosti.

3.1.4 Kogenerační jednotky

3.1.4.1 Perspektivy kogenerace

Kogenerace je kombinovaná výroba elektřiny a tepla pomocí pístových spalovacích motorů. Výhody tohoto systému spočívají v nižší spotřebě, menší produkci emisí, škodlivin a vyšší efektivitě. V teplárenských aplikacích dosahují kogenerační jednotky účinnosti 90%. Výkonově se tyto jednotky pohybují v rozmezí od desítek kW až po několik MW. Palivem pro kogenerační jednotky mohou být zemní plyny, topné oleje, biomasy, bioplyny, skládkové plyny, atd. Výhodou je, že vyrobená elektrická energie i teplo jsou spotřebovány v místě výroby a tím nám odpadají ztráty způsobené transportem energie na větší vzdálenost.



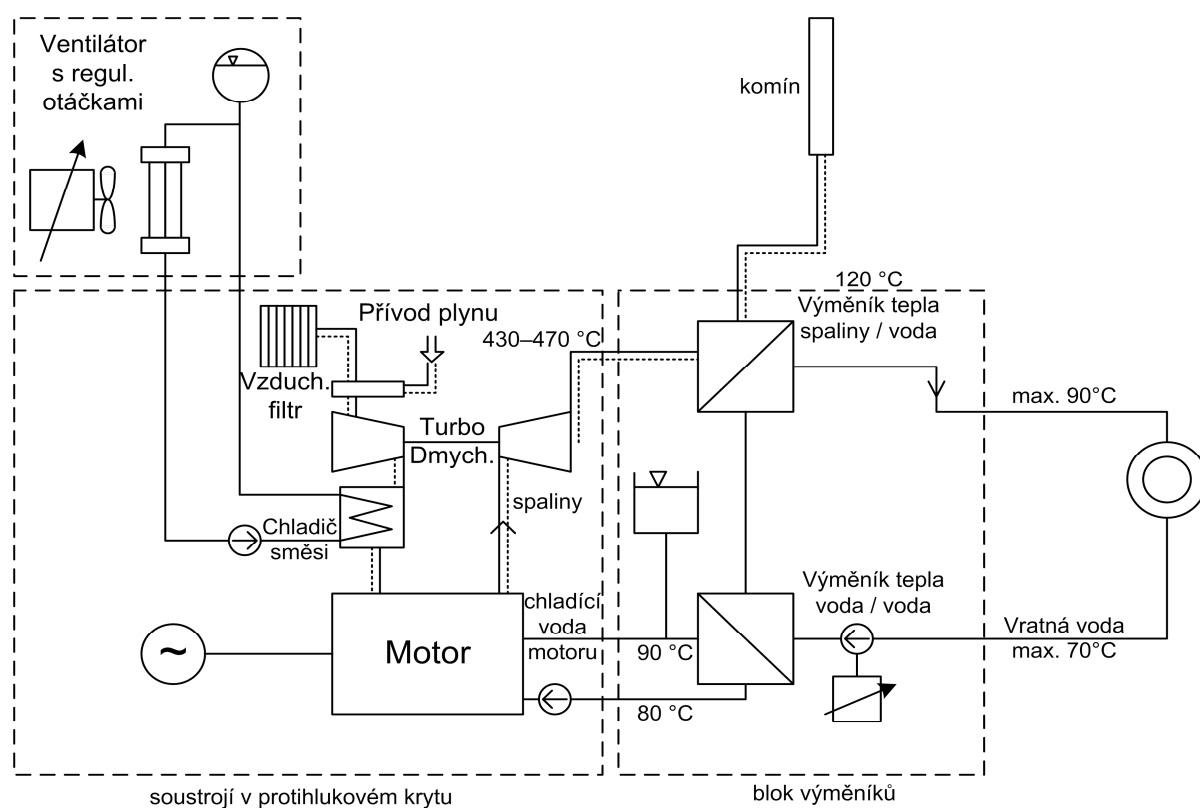
Obr. 3.1 Využité teplo a ztráty při kogeneraci

3.1.4.2 Základní vzorce pro výpočet účinností kogeneračních jednotek:

$$\eta_e = \frac{E}{Q_{pal}} \quad \text{elektrická účinnost [-]} \quad (3.1)$$

$$\eta_t = \frac{Q_{zc} + Q_{sv}}{Q_{pal}} \quad \text{tepelná účinnost [-]} \quad (3.2)$$

$$\eta_{tc} = \frac{E + Q_{zc} + Q_{sv}}{Q_{pal}} \quad \text{celková tepelná účinnost [-]} \quad (3.3)$$



Obr. 3.2 Schéma kogenerační jednotky

3.1.5 Trigenerace

Trigenerace je kogenerační jednotka vybavená chladícím zařízením. Disponuje přiměřeným chladícím výkonem pro klimatizační nebo technologické účely.

Obsahuje:

- kompresorové chladicí zařízení - poháněné elektromotorem z kogenerační jednotky
- absorpční chladicí zařízení - poháněné využitím odpadního tepla z kogenerační jednotky

Větší jednotky mohou být vybaveny jak kompresorovým, tak absorpčním typem chlazení. Tato varianta nám umožňuje pružnější přizpůsobení požadavkům odběru tepla a elektřiny.

Výhodnost trigenerace je podmíněna dostatečně velkým odběrem chladu. Pokud je její výkon optimálně navržen, může dodávka chladu zlepšit ekonomické charakteristiky v těchto směrech:

- při kompresorovém chlazení – náklady na elektrickou energii nižší než při jejím nákupu ze sítě
- při absorpčním chlazení – z paliva potřebného k získání tepla se vyrobí navíc elektrická energie, čímž dochází ke snížení celkových nákladů

[4] [5] [9] [10] [11]

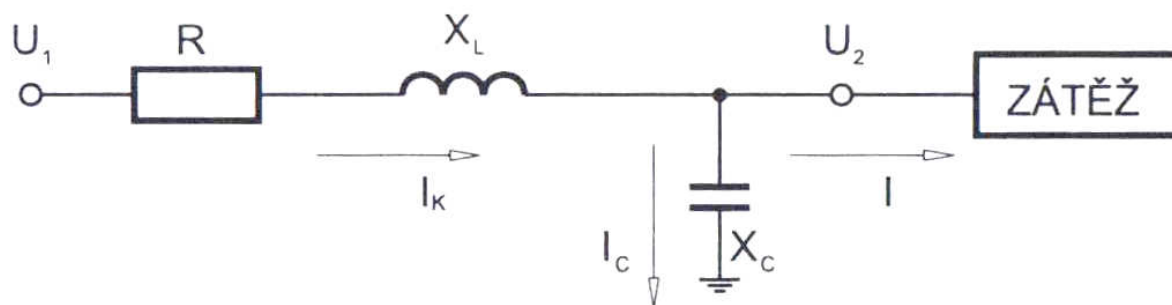
3.1.6 Kompenzace účinníku

Mezi základní prostředky ke snížení elektrických ztrát patří kompenzace účinníku. Kompenzovat účinník musí každý větší odběratel, aby přílišně nezatěžoval síť jalovou energií.

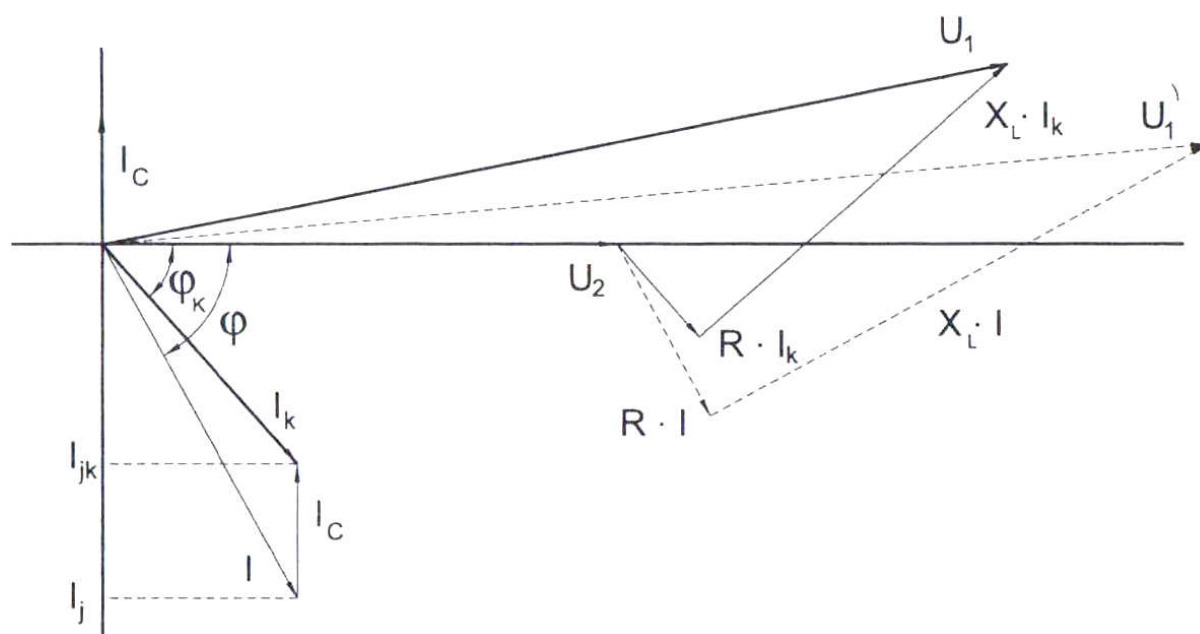
Většina elektrických spotřebičů (transformátory, indukční motory) využívá ke své činnosti magnetické pole. Proud odebíraný spotřebičem ze sítě se dělí na činnou složku proudu I_c (souvisí s odebíraným činným výkonem) a jalovou složku I_j (souvisí s odebíraným jalovým výkonem). Právě jalový proud zvyšuje celý odebíraný proud. Zvyšují se celkové přenosové ztráty a snižuje se průchodnost vedení. Induktivní ztráty jalového výkonu v síti můžeme snížit připojením kondenzátoru, který bude odebírat ze sítě jalový proud I_c a malý činný proud I_D , jenž pokryje dielektrické ztráty. Protože je velikost proudu I_D v rozmezí od 0,2 do 0,5 % jalového proudu I_c , můžeme jej zanedbat a kondenzátor v tomto případě považovat za ideální kapacitu. Těchto vlastností kondenzátoru můžeme využít ke kompenzaci účinníku tzv. omezení jalové složky proudu.

Způsob použití kondenzátorů v elektrických sítích:

- sériová kompenzace: kondenzátor je sériově s napájecím vedením, změní se charakteristika napájecí sítě. Tento způsob kompenzace se příliš nepoužívá a dále se jí ve své práci nebudu zabývat
- paralelní kompenzace: kondenzátor je paralelně se spotřebičem, změní se charakteristika zatížení - zvýší se průchodnost vedením a sníží se činné ztráty



Obr. 3.3 Schéma paralelní kompenzace dle literatury [14]



Obr. 3.4 Fázorový diagram paralelní kompenzace dle literatury [14]

Efekt paralelní kompenzace vychází z fázorového diagramu dle obr. 3.4. Nekompenzovaným vedením prochází proud I . Tento proud protéká též zátěží Z , na které vytváří úbytky napětí RI a $X_L I$. Po paralelním připojení kondenzátoru k zátěži se vektorově sečte proud zátěže I s proudem kondenzátoru I_C . Výsledný proud I_K pak protéká vedením a vytváří příslušné úbytky napětí RI_K a $X_L I_K$. Absolutní hodnota proudu I_K je menší než absolutní hodnota proudu, dochází ke zmenšení úbytku napětí a zároveň dochází ke snížení ztrát na vedení. Činná složka proudu se při kompenzaci nemění. Jalová složka se změní z hodnoty I_j na hodnotu I_{jk} . Úhel mezi napětím a proudem se změní z hodnoty φ na hodnotu φ_K . Ten je definován tzv. koeficientem kompenzace K a stupněm kompenzace K_p .

3.1.6.1 Pojmy související s paralelní kompenzací:

Koeficient kompenzace:

$$K = \frac{I_{JK}}{I_J} = \frac{\operatorname{tg} \varphi_K}{\operatorname{tg} \varphi} \quad (3.4)$$

kde

K	koeficient kompenzace [-]
I_{JK}	jalový proud po kompenzaci [A]
I_J	jalový proud před kompenzací [A]
φ	úhel mezi napětím a proudem před kompenzací
φ_K	úhel mezi napětím a proudem po kompenzaci

Stupeň kompenzace:

$$K_P = 1 - K = \frac{I_c}{I_J} = \frac{\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi_K}{\operatorname{tg} \varphi} \quad (3.5)$$

kde

I_c	proud kondenzátoru [A]
-------	------------------------

Ztráty ušetřené kompenzací:

$$\Delta P_{u\check{s}} = \Delta P \left(1 - \frac{\cos^2 \varphi}{\cos^2 \varphi_K} \right) \quad [\text{W}] \quad (3.6)$$

kde

ΔP	činné ztráty před kompenzací [W]
------------	----------------------------------

3.1.6.2 Prostředky ke kompenzaci účinníku

- statické kondenzátory
- rotační kompenzátory
- synchronní motory
- správná volba spotřebičů

3.1.6.2.1 Statické kondenzátory

Univerzální prostředek ke kompenzaci účinníku.

- výhody: malé ztráty od 0,3 do 0,5 % jmenovitého výkonu, nemají rotační části - jednoduchá údržba, nižší investice pro provoz
- nevýhody: obtížnější regulace jalového výkonu, nutnost spínání různých sérioparalelních variant

3.1.6.2.2 Rotační kompenzátory

Synchronní motory, běžící na prázdno v přebuzeném stavu.

- výhody: plynulá změna kompenzačního výkonu pomocí změny buzení těchto strojů, velký rozsah regulace jalového výkonu
- nevýhody: vyšší ztráty od 2 do 8 % jmenovitého výkonu, přítomnost rotačních částí - náročnější údržba

3.1.6.2.3 Synchronní motory

Stejně s synchronními kompenzátory s tím, že předávají mechanický výkon na hřídeli.

Změnou budícího proudu lze měnit účinník jak v induktivní tak i v kapacitní oblasti. Používají se v oblastech kde je očekáván stabilní zátěžový moment - pohony čerpadel, kompresorů, ventilátorů. Konstruovány pro sítě vn - převážně sítě 6kV. Nevhodné pro kompenzaci spotřebičů, jejichž spotřeba jalového výkonu se dynamicky mění - např. obloukové pece, dynamicky řízené reverzační stejnosměrné pohony. Využití mají pro centrální kompenzaci.

3.1.6.3 Způsoby kompenzace účinníku v elektrických sítích

Podle umístění kompenzačních jednotek máme kompenzaci:

- individuální - každý spotřebič má svůj vhodně naddimenzovaný kompenzační kondenzátor
- skupinovou - kompenzátorová baterie je připojena na podružný rozvaděč pro skupinu spotřebičů
- centrální - kompenzace prováděná z hlavní rozvodny přímo pro celý objekt

[9] [11] [14]

3.1.7 Vhodným propojením sítě

3.1.7.1 Typy sítí:

a) Paprsková síť - venkovní nebo kabelové vedení vychází z jednoho napájecího místa (transformovna nebo spínací stanice) zásobující jednotlivé odběry. Každý vývod (paprsek) je samostatný a nelze je vzájemně propojovat. Nejlacnější způsob rozvodu, avšak jistota zásobování nejmenší. Použití - obce, malá města, průmysl.

b) Okružní síť - někdy nazývána smyčkovou. Její paprsky nebo polosmyčky jsou vedeny tak, aby je bylo možno sepnout. Provozují se jako síť paprskové, tedy rozepnuté. Obvykle bývají dražší než paprskové sítě, při poruše je lze snadno ručně nebo automaticky přepnout na sousední vývod.

c) Zjednodušená mřížová síť - tuto síť je možno vytvořit v případě, že do ní pracují alespoň dva transformátory vn/nn. Mezi těmito transformátory je spojení hlavními vedeními s většími průřezy, jištění výkonovými pojistkami. Ve vhodných místech pro tzv. slabé vazby (SV) lze použít slabší pojistky. Tato síť reaguje na poruchy na straně nn, nikoliv na straně vn.

d) Klasická mřížová síť nn - použití ve všech větších městech s měrnou hustotou $1\text{MW}/\text{km}^2$ a více. Transformovny napájeny nejméně dvěma, v lepším případě třemi až pěti napáječi vn. Kabelové vedení nn je spojeno do uzlů na křižovatkách ulic. Jsou to vlastně skříně osazené pojistkami. Pojistky nn mají ve všech skříních stejnou jmenovitou hodnotu a pomalou charakteristiku. Klasické mřížové sítě se dělí podle počtu transformátorů 110kV/vn na jednosystémové, dvousystémové a vícesystémové. Na ně jsou připojeny distribuční transformátory vn/nn, které napájí klasickou mřížovou síť.

Tab. 3.1 Porovnání různých typů nn sítí dle literatury [12]

Vlastnosti	klasická mřížová síť	zjednodušená mřížová síť	paprsková síť
pravděpodobnost výpadku	1	4 až 5x vyšší	9000x vyšší
jistota zásobování	největší	větší	malá
napětí - kvalita (kolísání) - úbytek ΔU	- stabilní napětí, světlo neblíká, - nejmenší ΔU	- méně kolísá než v paprskové síti - asi $1/2 \Delta U$ než v paprskové síti	- nestabilní U - velký ΔU
využití transformátorů a vedení	ušetří 30% Sn transf., nejlepší využití	střední	malé využití, nestejnosměrné zatěžování
zkratové proudy	nejvyšší	střední	nejnižší
poruchy v síti vn	neovlivní napájení	výpadek U	výpadek U
poruchy v síti nn	neovlivní napájení	neovlivní napájení	výpadek U
ztráty elektrické energie	až o 30% menší než paprskové	střední	velké

[12]

3.1.8 Zvyšování přenosových schopností pomocí posilovacích vývodů v distribučních sítích nn

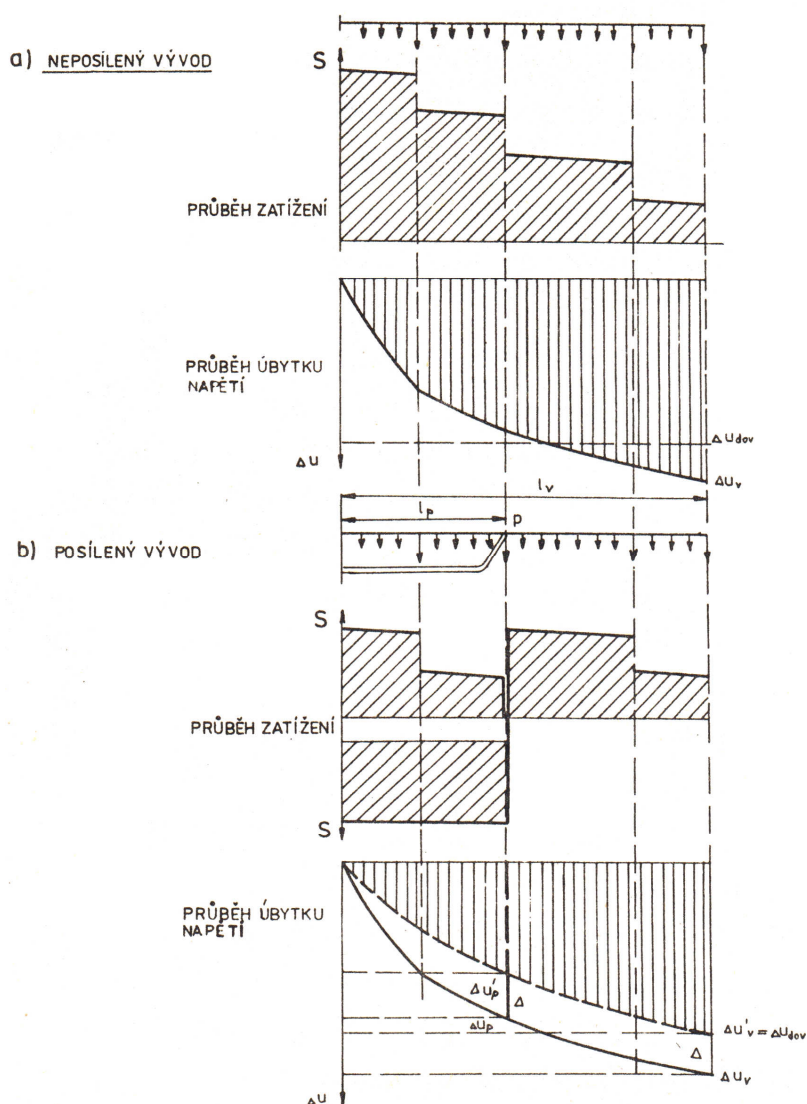
Trvalý růst zatěžování distribučních sítí má za následek nutné zvyšování přenosových schopností sítí nízkého napětí. Ke zvýšení propustnosti elektrické sítě je možno:

- zahustit elektrické sítě pomocí nové distribuční transformační stanice vn/nn
- posílit elektrické sítě nn posilovacími vývody.

Tyto metody jsou jediným ekonomicky výhodným řešením při nepředvídaných nárůstech spotřeby elektrické energie.

Na obr. 3.5a je naznačen průběh zatížení vývodu z trafostanice. Nárůstem zatížení došlo v určité části k překročení dovoleného úbytku napětí, z čehož plyne, že maximální úbytek na konci vedení Δu_v je větší než dovolený úbytek napětí Δu_{dov} .

Pomocí paralelního posilovacího vývodu (viz. obr. 3.5b) o délce l_p dojde ke snížení původní velikosti odporu R_v na hodnotu odporu R'_v a na konci posilovacího vývodu dojde ke snížení úbytku napětí z Δu_p na $\Delta u'_p$. Jelikož se zatěžovací poměry na zbývajícím úseku nezmění, sníží se o tutéž hodnotu i úbytek napětí na konci vedení z Δu_v na $\Delta u'_v$.



Obr. 3.5 Posílený a neposílený vývod z transformační stanice

Když

$$\Delta u_p - \Delta u'_p = \Delta u_v - \Delta u'_v, \quad (3.7)$$

je nutno najít takový odpor posilovacího vedení, aby byl dovolený úbytek na konci vedení po připojení posilovacího vedení:

$$\Delta u'_v \leq \Delta u_{dov} \quad (3.8)$$

Poměr úbytku napětí při nezměněné zátěži:

$$\frac{\Delta u_p}{\Delta u'_p} = \frac{R_v}{R'_v} = \frac{R_v}{\frac{R_v \cdot R_p}{R_v + R_p}} = \frac{R_v + R_p}{R_p} = \frac{r_v + r_p}{r_p} \quad \text{kde měrný odpor } r = R \cdot l \quad (3.9)$$

Výchozí rovnice pro návrh parametrů posilovacího vývodu:

$$\Delta u_p = \left(\frac{r_p}{r_v} + 1 \right) \cdot (\Delta u_v - \Delta u_{dov}) \quad (3.10)$$

3.1.8.1 Postup vhodný pro stanovení parametru posilovacího vývodu:

- ze zadaných zatěžovacích poměrů je potřeba stanovit maximální úbytek napětí Δu_v na konci vývodu a porovnat ho s Δu_{dov} . Pokud je dovolený úbytek napětí překročen, provede se návrh posilovacího vývodu.
- zvolí se průřez a odpor posilovacího vývodu
- spočítá se nebo odečte z grafické závislosti délka posilovacího vývodu
- zkontroluje se úbytek napětí na konci posíleného vývodu

[19]

3.2 Možnosti snižování ztrát bez finančních nároků

3.2.1 Hospodárný skupinový chod a zatěžování transformátorů

Nejužívanějšími stroji v energetice jsou transformátory, proto má hospodárný skupinový chod a hospodárné zatěžování těchto strojů v elektrické síti velký význam. Transformátor se chová v elektrické síti jako spotřebič, způsobuje v ní ztráty čímž ji zatěžuje.

Činné ztráty transformátoru:

$$\Delta P_T = \Delta P_0 + \beta^2 \cdot \Delta P_K \quad [\text{kW}; \text{kW}] \quad (3.11)$$

kde

$$\beta = \frac{S_s}{S_n} \quad \text{zatěžovatel [-]} \quad (3.12)$$

Jalový příkon transformátoru (ztráty):

$$\Delta Q_T = \Delta Q_0 + \beta^2 \cdot \Delta Q_K = \frac{S_n}{100} \cdot i_0 + \beta^2 \cdot \frac{S_n}{100} \cdot u_k \quad [\text{kVar}] \quad (3.13)$$

3.2.1.1 Skupinový chod transformátorů:

Transformátory mohou pracovat paralelně když mají:

- stejné jmenovité vstupní i výstupní napětí (stejný převod)
- stejné napětí na krátko
- stejné napětí na odbočkách
- stejný hodinový úhel
- nejvyšší výkonový poměr 1:2, transformátor s menším S_n by měl mít větší u_k . Chod paralelně řazených transformátorů je vyhovující, dosáhne-li transformátor s menším u_k 95 % součtu jmenovitých výkonů obou transformátorů a nedojde-li k jeho přetížení.

Bude-li zatížení transformátorů rozloženo v jejich S_n , budou činné ztráty, při současném chodu několika transformátorů nejmenší. Při paralelním chodu má skupina dvou transformátorů poloviční ztráty v mědi a dvojnásobné ztráty v železe.

Celkové ztráty dvou transformátorů:

$$\Delta P_T^{II} = 2 \cdot (\Delta P_0 + k_\Delta \cdot Q_0) + \left(\frac{1}{2} \cdot \beta \right)^2 \cdot (2 \cdot \Delta P_k + 2 \cdot k_\Delta \cdot \Delta Q_k) \quad [\text{kW}] \quad (3.14)$$

Rovnice ztrát pro jeden transformátor:

$$\Delta P_T^I = \Delta P_0 + k_\Delta \cdot \Delta Q_0 + \beta^2 \cdot (\Delta P_k + k_\Delta \cdot \Delta Q_k) \beta^2 \quad [\text{kW}] \quad (3.15)$$

Výkon, při kterém je vhodné připojit druhý transformátor k prvnímu, nazýváme přechodový výkon.

Platí tedy $\Delta P_T^I = \Delta P_T^{II}$. Úpravou a dosazením vznikne vztah pro přechodný výkon:

$$S_{př} = S_n \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta P_0 + k_\Delta \cdot Q_0}{\Delta P_k + k_\Delta \cdot Q_k}} \quad [\text{kVA}] \quad (3.16)$$

Připojením či odpojením dalšího transformátoru lze přechodný výkon skupiny n transformátorů odvodit vzorcem podobným způsobem.

Připojování transformátoru z n na $n+1$:

$$S_{př} = S_n \cdot \sqrt{n \cdot (n+1) \cdot \frac{\Delta P_0 + k_{\Delta} \cdot Q_0}{\Delta P_k + k_{\Delta} \cdot Q_k}} \quad [\text{kVA}] \quad (3.17)$$

Odpojování transformátoru z n na $n-1$:

$$S_{př} = S_n \cdot \sqrt{n \cdot (n-1) \cdot \frac{\Delta P_0 + k_{\Delta} \cdot Q_0}{\Delta P_k + k_{\Delta} \cdot Q_k}} \quad [\text{kVA}] \quad (3.18)$$

V době špičkového denního zatížení velkých transformátorů je třeba uvážit vhodnost jejich připojení či odpojení. Časté připojování na krátkou dobu způsobuje velké opotřebení spínačů, což je i vzhledem k ušetřeným ztrátám nevýhodné (platí u sítí, které mají dosti proměnlivý denní průměr zatížení).

3.2.1.2 Hospodárné zatížení transformátoru:

Tab. 3.2 Hodnoty součinitele k_{Δ} [13]

Místo instalace transformátoru	Hodnota součinitele k_{Δ} v maximu zatížení sítě
1. transformátor připojený k přípojnicím v elektrárně	0,02
2. transformátory v zařízeních městských nebo průmyslových připojený na 6 nebo 10kV (generátoru)	0,07
3. transformátory na napětí 22 až 110kV v raónových sítích	0,15
4. transformátory jako v bodě 2, připojené přes oblastní síť vn	0,15
5. transformátory jako v bodě 4, avšak jalová spotřeba je z části kryta místními kondenzátory	0,05

pozn.: Růst činitele k_{Δ} využití transformátoru

Rovnice celkových ztrát zatíženého transformátoru:

$$\Sigma \Delta P_T = \Delta P_0 + k_{\Delta} \cdot \Delta Q_0 + \beta^2 \cdot (\Delta P_k + k_{\Delta} \cdot \Delta Q_k) \beta^2 \quad [\text{kW}] \quad (3.19)$$

Hospodárné zatížení, rovnice vychází z měrných ztrát:

$$\Delta p = \frac{\Delta P_T}{S_S} = \frac{\Delta P_0 + k_\Delta \cdot Q_0}{S_S} + \frac{(\Delta P_k + k_\Delta \cdot Q_k) \cdot S_S}{S_n^2} \quad [\text{kW}; \text{kW}, \text{kVA}] \quad (3.20)$$

Jestliže položíme první derivaci výše uvedené rovnice nule, získáme požadované minimum měrných ztrát:

$$\frac{d\Delta p}{dS} = \frac{\Delta P_0 + k_\Delta \cdot Q_0}{S_S} + \frac{(\Delta P_k + k_\Delta \cdot Q_k) \cdot S_S}{S_n^2} = 0 \quad (3.21)$$

Touto úpravou získáme vztah hospodárných zatížení transformátoru:

$$S_e = S_n \cdot \sqrt{\frac{\Delta P_0 + k_\Delta \cdot Q_0}{\Delta P_k + k_\Delta \cdot Q_k}} \quad [\text{kVA}] \quad (3.22)$$

Pro hospodárný činitel poměrného zatížení je odvození podobné:

$$\beta_e = \frac{S_e}{S_n} \cdot \sqrt{\frac{\Delta P_0 + k_\Delta \cdot Q_0}{\Delta P_k + k_\Delta \cdot Q_k}} \quad [-] \quad (3.23)$$

Doba provozu a zatížení transformátoru má vliv na hospodárnou velikost zatížení.

[12] [13] [15] [16]

3.2.2 Regulace napětí

Při přenosu a rozvodu elektrické energie se v sítích vvn a vn udržuje vyšší napětí z důvodu zmenšení činných a jalových ztrát a zvýšení výkonové průchodnosti. Dovolené odchylky jsou až + 10 % U_n . Opakem je zvyšování napětí v sítích nn. Zde dochází ke zvyšování ztrát a snižování životnosti elektrických spotřebičů. Maximální dovolená horní odchylka v sítích nn je + 5 % U_n .

Nižší napětí u spotřebičů v síti nn má za následek snížení ztrát, jelikož dojde ke snížení odebíraného proudu spotřebičem a tím se sníží i celkový odebíraný výkon. Nižší výkon se ovšem projevuje např. delší dobou vaření, snížením záběrného momentu asynchronních motorů, sníženou svítivostí žárovek, atd. Díky tomu je dovolená odchylka v sítích nn jen - 5 % U_n .

V následující tabulce 3.3 jsou znázorněny přibližné hodnoty snížení ztrát při zvýšeném napětí a stejném přenášeném výkonu v sítích.

Tab. 3.3 Zmenšení ztrát při zvyšování napětí dle literatury [12]

	Sítě vvn, vn			Spotřebiče
ΔU [%]	+ 2	+ 5	+ 10	+ 1
ΔP [%]	- 5	- 9,5	- 17,5	+ 0,4
ΔQ [%]	- 10	- 15	- 20	+ 2

[12]

3.2.3 Vhodné propojení sítě

U ideálních sítí, které by byly propojené v různých místech, by docházelo k přirozenému rozdělení proudů a výkon by byl přenášen s nejmenšími ztrátami. V reálném případě toto však není možné, a proto potřebujeme síť rozdělit na oblasti či úseky. Vhodným propojením sítě je potřeba vyhovět požadavkům provozním, ale i požadavkům na co nejnížší ztráty.

[16]

3.2.4 Rozdělení zatížení mezi elektrárnami

Rozdělení zatížení mezi elektrárnami z pohledu celorepublikového měřítko řeší terciální regulace působením na sekundární regulaci. Terciální regulace má za úkol zajistit minimální investiční náklady na dodávku elektrické energie.

[16]

3.2.5 Zmenšení nesouměrnosti zatížení

Špatné rozdělení spotřebičů (zatížení) způsobuje mezi jednotlivými fázemi trojfázové soustavy nesouměrné zatížení. V jednotlivých fázích tečou rozdílné proudy a vznikají ztráty elektrické energie. Zatížení takovéto sítě přenášeným výkonem je mnohonásobně větší než v rovnoměrně zatížené síti.

[15]

3.2.6 Hospodárné zatěžování vodičů

Tohoto úkolu se poprvé „zhostil“ Kelvin, za předpokladu vodiče zatíženého stálým proudem I . Vedení musí mít optimální průřez vodiče. Tato podmínka je splněna, pokud jsou roční investice i investice na ztráty v závislosti na průřezu vodiče minimální.

Celkové investiční náklady na stavbu vedení K_i je možno vyjádřit v závislosti na průřezu takto:

$$K_i = (A + B \cdot S) \cdot l \quad [\text{Kč.rok}^{-1}] \quad (3.24)$$

kde

A stálé náklady (nezávislé na průřezu) na jednotku délky vedení
 B náklady závislé na průřezu na jednotku vedení
 l celková délka vedení

Roční investiční náklady na stavbu vedení:

$$N_i = K_i \cdot p \quad [\text{Kč.rok}^{-1}] \quad (3.25)$$

kde

p roční odpisy

Náklady za roční ztráty na vedení:

$$N_{\Delta} = \Delta P \cdot (c_p + c_w \cdot \tau_z) \quad [\text{Kč.rok}^{-1}] \quad (3.26)$$

kde

c_p měrné náklady na výkon $[\text{Kč/kW.rok}]$
 c_w měrné náklady na energii $[\text{Kč.kWh}^{-1}]$
 τ_z doba plných ztrát $[\text{h.rok}^{-1}]$

Vyjádření ztrát v trojfázovém vedení:

$$\Delta P = k \cdot \frac{P^2}{U^2 \cdot \cos^2 \varphi} \cdot \rho \cdot \frac{l}{S} \quad [\text{kW}] \quad (3.27)$$

kde

k činitel zatížení

Po dosazení do nákladů za roční ztráty:

$$N_{\Delta} = k \cdot \frac{P^2}{U^2 \cdot \cos^2 \varphi} \cdot \rho \cdot \frac{l}{S} \cdot (c_p + c_w \cdot \tau_z) \quad [\text{Kč.rok}^{-1}] \quad (3.28)$$

Celkové roční ztráty N je možné získat součtem ročních nákladů (3.25) a ročních investičních nákladů (3.28) na stavbu vedení.

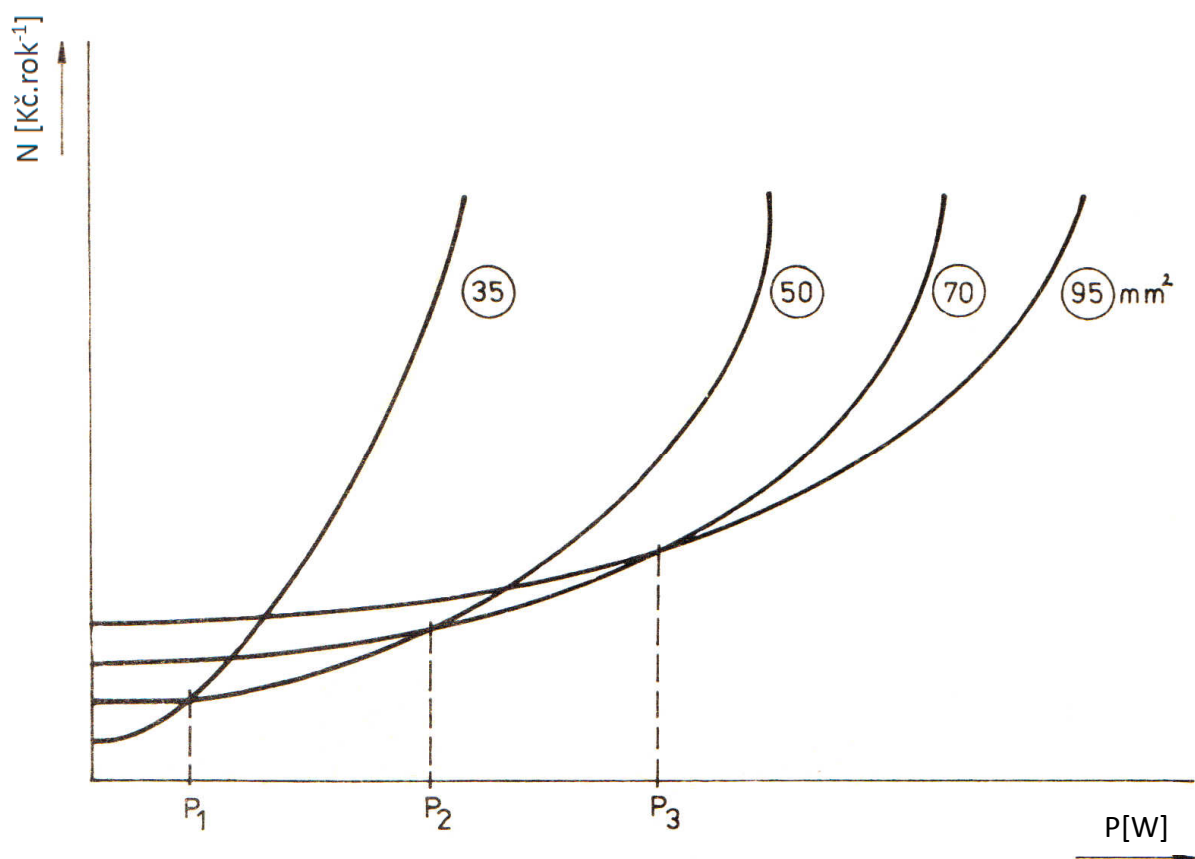
$$N = N_i + N_{\Delta} = (A + BS)p \cdot l + k \cdot \frac{P^2}{U^2 \cdot \cos^2 \varphi} \cdot \rho \cdot \frac{l}{S} \cdot (c_P + c_W \cdot \tau_Z) \quad [\text{Kč.rok}^{-1}] \quad (3.29)$$

Hospodárný průřez vedení určený z minima celkových nákladů (z podmínky $\frac{dN}{dS} = 0$):

$$S_{HOSP} = \frac{P}{U \cdot \cos \varphi} \cdot \sqrt{\frac{k \cdot \rho}{B \cdot p} (c_P + c_W \cdot \tau_Z)} \quad [\text{mm}^2] \quad (3.30)$$

Zjednodušené vyjádření funkce přenášeného výkonu vycházející z rovnice celkových ročních nákladů:

$$N = a + b \cdot P^2 \quad (3.31)$$



Obr. 3.6 Závislost celkových ročních nákladů na přenášeném výkonu pro různé normalizované průřezy

[11]

3.2.7 Zajištění rovnováhy mezi výrobou a spotřebou elektrické energie

Kvůli velmi omezené možnosti skladování elektrické energie je potřeba v elektrizační soustavě udržovat stálou rovnováhu mezi vyrobenou a spotřebovanou elektrickou energií. Spotřeba elektrické energie je v průběhu dne různá kvůli velkému rozmezí spotřeby a značného dynamického zatížení. Rovnováhu mezi výrobou a spotřebou lze zajistit pomocí určitých technických a organizačních opatření, a to jak v oblasti výroby, tak i v oblasti spotřeby elektrické energie.

U velkých odběratelů jsou k dispozici systémy regulace spotřeby a ve výrobních regulace výroby elektrické energie (zajištěno pomocí odběrových diagramů a regulačních stupňů). U maloodběratelů jsou možnosti regulace omezené na přepínání tarifních sazeb pomocí spínacích hodin (popř. zablokováním některých spotřebičů na určité časové období).

HDO, nebo-li systém hromadného dálkového ovládání, má možnost operativně řídit maloodběr. Lze jím řídit odběr elektrické energie u různých skupin odběratelů z centrálního místa a s okamžitými potřebami provozu elektrizační soustavy. Významným způsobem zvyšuje ekonomiku provozu a vyrovnává diagram zatížení elektrizační soustavy.

[19]

3.2.8 Pravidelná údržba zařízení

Bezpečný provoz zařízení je zaručen jeho pravidelnou údržbou, čímž dochází k zamezení zbytečných ztrát elektrické energie. Při lezeckých revizích nebo pochůzkách kolem vedení lze odhalit vadné izolátory, pojistky či spoje. Pravidelná revize řetězců izolátorů na vedení vvn může odhalit místa úniku malých svodových proudů. Neméně důležitá je kontrola stavu bleskojistik. Včasnou výměnou poškozené bleskojistky je možno předejít trvalému zemnímu spojení.

[15]

3.2.9 Řízení energetické soustavy

Celostátní dispečink má na starost řízení provozu celé energetické soustavy s mnoha zdroji, ty jsou propojeny sítí elektrických vedení. Celková délka všech linek dle ČEPS v roce 2010 byla 4395km, z toho 68 % (2979km) představovaly linky 400kV, 31 % (1371km) linky 220kV a 1 % (44km) linky 110kV.

Jelikož elektřinu nelze skladovat, musí být její výroba v každém okamžiku v rovnováze se spotřebou. Vyšší schopnost regulovat soustavu je možné při vzájemném propojení v rámci všech větších sítí. Česká republika se proto v roce 1995 propojila se západoevropskou elektrizační soustavou

UCPTE (dnes UCTE), do níž patří Polsko, Maďarsko a Slovensko. Cílem vzájemného propojení je snížení ztrát elektrické energie ve vedení. Elektrickou energii si lze vyměňovat a vypomáhat si navzájem při poruchách nebo náhlých změnách spotřeby. Navíc je možné si ze soustavy vybrat nejlevnějšího prodejce elektřiny.

V souvislosti s liberalizací evropského vnitřního trhu s elektřinou velmi vzrůstá význam přeshraničních obchodů. Nařízení č. 1228/2003 Evropského parlamentu a rady o podmínkách pro přístup k síti pro přeshraniční výměny elektřiny je zaměřeno na stanovení spravedlivých pravidel pro tyto výměny, čímž podporuje konkurenci na vnitřním trhu s elektřinou. Toto nařízení zahrnuje ustanovení kompenzačního mechanismu pro přeshraniční toky a soubor sladěných principů přeshraničních poplatků a lokací (přidělení) dosažitelné kapacity propojení mezi národními přenosovými systémy.

[4] [5]

Závěr:

Cílem této bakalářské práce je podat ucelený a podrobný rozbor ztrát při výrobě, přenosu a rozvodu elektrické energie. V první části je nastíněno stručné rozdělení elektrických ztrát podle specifických charakteristik, přičemž každá z kapitol blíže rozvádí jejich vznik a nastiňuje též fungování v závislosti na okolnostech, za nichž k samotným ztrátám dochází. Jsou zde tak shrnuty základní poznatky a definice o pojmech, které jsou pro zvolené téma klíčové a z nichž ve zbývajících oddílech práce vycházím.

Navazující druhá část je již samotným pronikáním do problematiky jednotlivých ztrátových druhů, zpravidla graficky demonstrovaných či doplněných vzorci k výpočtu kontextově souvisejících veličin. Pro přehlednost jsem postupoval vždy u každé podkapitoly od vymezení pojmu a jeho číselné vztahové vyjádření vzorci až směrem k využití dané ztráty v reálné praxi. V samotné obsahové části se již tedy věnuji přímo bližší analýze ztrát technických stálých, s ohledem na širší typové rozrůznění a jejich uplatnění v ČR, ztrát technických proměnných stejně tak jako ztrát netechnických, vždy s bližším upřesněním jednotlivých ztrát poddílích.

Mou snahou bylo především přiblížení principů fungování, resp. příčin existence jednotlivých ztrátových momentů, a to takovým způsobem, který mi umožnil v třetí části práce zhodnotit jednu z nejzásadnějších a v praxi nejvíce diskutovaných problematik týkajících se způsobů, s nimiž by bylo možné ztráty nejen efektivně zaznamenávat a měřit, ale především dohledat jejich důsledky a snažit se jim předcházet nebo je alespoň v co největší míře eliminovat. Proto operuji s jednotlivými metodami snižování ztrát, přičemž jako podstatné hodnotím především jejich nákladnost, ať již časovou, nebo investiční a jejich začlenění do mechanismu růstu nových trendů. Z těch, do nichž je nutné investovat, rozhodně zmíním snižování ztrát kompenzací účinku, především díky mnohotvárnosti použití této techniky. V rámci neinvestičních metod bych poukázal, právě pro ono „kouzlo jednoduchosti“ na tak důležitou a neprávem opomíjenou údržbu zařízení, neboť napříč dobou zůstává tento postup skutečně efektivním, je ovšem vždy potřeba vyvinout větší úsilí při kontrolách všech zařízení a prvků v elektrizační soustavě. Právě snižování ztrát je myslím výhledově velmi důležitou oblastí výše zpracované tematiky, v níž vidím budoucnost a na níž by bylo velmi dobré se zaměřit, nejen z hlediska životního prostředí, ale především díky úspornosti, která při spotřebovávání většiny energetických zdrojů chybí.

Použitá literatura:

- [1] VITNER, STANISLAV. *Určení účinnosti užití energie při přenosu, distribuci a vnitřním rozvodu elektřiny podle vyhlášky MPO č. 153/2001 Sb. (Energetika 03/2004)* [online]. [cit 2011-09-17]. Dostupné z: http://www.energetik.cz/hlavni3.html?m1=/clanky/en_2004_03_1.html
- [2] Solid Elektro Team Olomouc.: *Elektro v praxi 1*, Olomouc 2006
- [3] VÝZKUMNÉ ENERGETICKÉ CENTRUM VŠB-TUO. *Moderní energetické stroje* [online]. [cit. 2011-09-18]. Dostupné z: <http://vec.vsb.cz/cs/doc/moderni.pdf>
- [4] *Moderní tepelná elektrárna* [online]. [cit. 2011-09-18]. Dostupné z: <http://www.vodni-tepelne-elektrarny.cz/moderni-tepelna-elektrarna.htm>
- [5] *Zajímavá čísla* [online]. [cit. 2011-09-23]. Dostupné z: <http://www.ceps.cz/CZE/Media/Stranky/Zajimava-cisla.aspx>
- [6] STUDIJNÍ MATERIÁLY VŠB - TUO. *Výroba a užití elektrické energie - Tepelné elektrárny* [online]. [cit. 2011-10-03]. Dostupné z: http://fe1.vsb.cz/kat410/studium/studijni_materialy/vuee/VUEE_Elektrarny_priklady.pdf
- [7] *Rozvodné sítě* [online]. [cit. 2011-11-10]. Dostupné z: <http://jjohnyk.sweb.cz/elektrotechnika/12.htm>
- [8] RUDOLF, LADISLAV. *Komplexní rozbor elektrických ztrát vedení přenosové soustavy*. Ostrava, 2009. Habilitační práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. SIGN 201000378
- [9] Studijní materiály FEI VŠB-TUO
- [10] BUKAČ, PETR. *Kogenerace pro rodinné domy* [online]. [cit. 2012-01-15]. Dostupné z: <http://www.nazeleno.cz/energie/energetika/kogenerace-pro-rodinne-domy-vyrabejte-teplo-a-elektrinu-najednou.aspx>
- [11] SANTARIUS, PAVEL. *Elektroenergetika I*. Skripta VŠB-TU Ostrava, 1984
- [12] ŠTROBLOVÁ, MILADA. *Elektrické sítě městské a průmyslové I*. ZČU Plzeň: ZČU Plzeň - ediční středisko, 1994. ISBN 80-7082-154-X.
- [13] PAVLOVSKÝ, BOHUMÍR. *Elektrické sítě v městech a sídlištích*. Praha 1: SNTL, 1975. ISBN 04-531-75.
- [14] KORENC, VLADIMÍR. *Kompenzace jalového výkonu v praxi*. Praha: IN-EL, 1999. ISBN 80-86230-07-4.

- [15] CHLEBEK, VLADIMÍR. *Ztráty v distribučních sítích*. Ostrava, 2002. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. SIGN 33101/9099
- [16] HORSÁG, MAREK. *Ztráty elektrické energie v distribučních sítích*. Ostrava, 2003. Diplomová práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. SIGN 33101/9379
- [17] *Vlastní spotřeby* [online]. [cit. 2012-03-18]. Dostupné z: <http://www.vlastnispotreby.info>
- [18] PŘÍLOHA K VYHLÁŠCE SBÍRKY ZÁKONŮ Č.153/2001. *Způsob určení technických ztrát elektrické energie* [online]. 2001 [cit. 2012-03-18]. Dostupné z: <http://www.vlastnispotreby.info/DOC/V153-2001.pdf>
- [19] SANTARIUS, PAVEL. *Elektrické stanice a vedení*. Ostrava: VŠB-TUO strojní a elektrotechnická fakulta, 1990. ISBN 80-7078-032-0.
- [20] ČEZ, a.s. *Podklady a technická dokumentace*